

# 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验

周华<sup>1,2</sup> 张文良<sup>1,2</sup> 杨全军<sup>1,2</sup> 李东东<sup>1,2</sup> 夏俊芳<sup>1,2</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 针对长江中下游地区黏重土壤深松作业阻力大的问题, 基于滑切和自激振动减阻的原理, 设计了滑切型自激振动深松装置。对滑切型铲柄的滑切角及刃口角进行了分析及参数设计, 通过有限元分析, 表明铲柄强度符合设计要求, 自激振动弹簧采用内外双弹簧以减小自激振动装置的结构尺寸。土槽对比试验表明, 固定连接方式滑切型深松铲在各速度下相对于传统弧形深松铲减阻 7.79% ~ 8.81%, 自激振动连接方式滑切型深松铲在各速度下相对于传统弧形深松铲减阻 15.45% ~ 20.05%。田间性能试验表明, 深松后各深度下土壤坚实度下降显著, 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 深度下土壤坚实度分别减小 78.18%、56.08% 和 62.72%; 深松后各深度下土壤容重下降 14.66% ~ 20.81%, 土壤含水率在 0 ~ 10 cm 略有下降, 在 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 略有上升; 土壤扰动系数均值为 60.8%, 土壤蓬松度均值为 11.9%; 深松深度及其稳定性系数符合行业标准, 滑切型自激振动深松装置作业质量总体满足作业要求。

**关键词:** 黏重土壤; 滑切; 深松; 自激振动; 减阻

**中图分类号:** S222.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0071-08

## Design and Experiment of Sliding Cutting Self-excited Vibration Drag Reduction Subsoiling Device

ZHOU Hua<sup>1,2</sup> ZHANG Wenliang<sup>1,2</sup> YANG Quanjun<sup>1,2</sup> LI Dongdong<sup>1,2</sup> XIA Junfang<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large resistance of clay soil by subsoiling in mid-lower Yangtze River, based on the principle of sliding cutting and self-excited vibration, a sliding cutting self-excited vibration subsoiling device was designed. The sliding cutting angle and cutting edge angle of the sliding cutting shovel handle were analyzed and the parameters were designed. The finite element analysis showed that the strength of the shovel handle met the design requirements, and the internal and external double springs were designed to reduce the structural size of the self-excited vibration device. The soil tank comparing test showed that, compared with the traditional arc subsoiling shovel, the fixed connection mode of sliding cutting subsoiling shovel reduced drag by 7.79% ~ 8.81% at various speeds, and the self-excited vibration connection mode of sliding cutting subsoiling shovel reduced drag by 15.45% ~ 20.05% at various speeds. Field performance test showed that the soil firmness was decreased significantly at different depths after subsoiling, which was decreased by 78.18%, 56.08% and 62.72% at depths of 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm and 20 ~ 30 cm, respectively. Soil bulk density was decreased by 14.66% ~ 20.81% at different depths after subsoiling. Soil moisture content was decreased slightly at 0 ~ 10 cm, and increased slightly at 10 ~ 20 cm and 20 ~ 30 cm. The average soil disturbance coefficient was 60.8% and the average soil bulkiness was 11.9%. The subsoiling depth and its stability coefficient conformed to the index. The working quality of sliding cutting self-excited vibration subsoiling met the operation requirements as a whole. The research results can provide reference for the study of subsoiling drag reduction.

**Key words:** clay soil; sliding cutting; subsoiling; self-excited vibration; drag reduction

收稿日期: 2018-10-15 修回日期: 2018-12-13

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503136)和国家重点研发计划项目(2017YFD0301300)

作者简介: 周华(1991—), 男, 博士生, 主要从事现代农业装备设计及测控研究, E-mail: zhouhua688@163.com

通信作者: 夏俊芳(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备设计及测控研究, E-mail: xjf@mail.hza.edu.cn

## 0 引言

传统的农业旋耕作业耕深一般不超过 15 cm, 多年的作业碾压使土壤形成坚硬的犁底层, 不利于土壤的蓄水保墒和作物的根系发展<sup>[1-3]</sup>, 深松是解决上述问题的主要措施。深松作业不但可以有效改良土壤的物理状况, 还对提高作物产量具有明显的促进作用<sup>[4-8]</sup>, 已经成为国家重点推行的保护性耕作方式。由于深松部件作业时牵引阻力较大, 对拖拉机的动力配备要求较高, 因此通过对深松部件及其连接方式的优化及改进来降低其牵引阻力, 成为深松技术发展的主要方向<sup>[9-11]</sup>。

当前, 国内外学者对深松作业的减阻问题进行了一系列研究。文献[12-13]利用仿生学原理对深松铲进行了设计, 并与传统深松铲进行了对比试验和分析。文献[14-15]以离散元为基础对深松铲的刃口曲线进行了设计, 并证明减阻效果明显。研究表明, 振动深松可有效降低深松作业阻力, 主要包括强迫振动<sup>[16-18]</sup>和自激振动<sup>[19-22]</sup>两种方式。强迫振动虽然可以降低深松作业阻力, 但需拖拉机动力输出轴额外提供振动源; 自激振动靠弹簧的伸长与压缩使深松铲产生振动, 不需额外提供动力。

不同地区的土壤条件相差较大, 因而适用于不同地区的深松方式也不尽相同, 一些学者对深松减阻的研究均为对刃口或连接方式的单一设计, 研究方式较为单一。目前, 对长江中下游地区黏重土壤的深松研究不多, 该地区土壤黏性较大, 导致深松作业牵引阻力较大。针对上述存在的问题, 本文结合滑切和自激振动两种方法设计滑切型自激振动深松装置, 滑切型铲柄可通过滑切土壤起到减阻的作用, 同时弹簧预紧力可调的自激振动装置可进一步降低牵引阻力, 达到双重减阻的目的。为测试滑切型自激振动深松装置的减阻效果和作业效果, 在土槽实验室中与传统弧形深松铲进行牵引力对比试验, 并在黏重土壤条件下进行田间性能试验, 以期对深松减阻研究提供参考。

## 1 深松装置结构与工作原理

滑切型自激振动深松装置结构如图 1 所示, 主要由滑切型铲柄、自激振动装置及连接调节装置组成。其中自激振动装置主要包括外部的弹簧套筒、紧定螺母和预紧螺栓, 以及内部的大小两个弹簧、限位管、连接销和滑块(如图 2 所示), 连接调节装置主要包括 1 个前连接板和 2 个后连接板, 滑切型自激振动深松装置通过固定块连接在机架上。

深松装置作业之前, 通过调节预紧螺栓对滑块

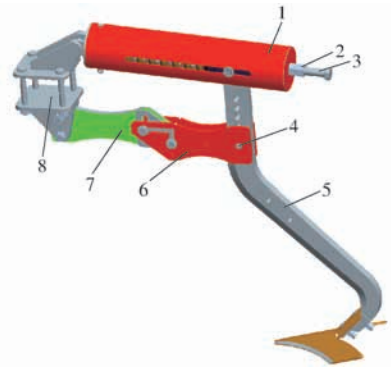


图 1 滑切型自激振动深松装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of sliding cutting self-excited vibration subsoiling device

1. 弹簧套筒 2. 紧定螺母 3. 预紧螺栓 4. 铰接销 5. 滑切型铲柄 6. 后连接板 7. 前连接板 8. 固定块

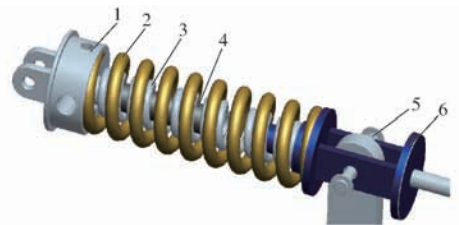


图 2 自激振动装置内部结构图

Fig. 2 Internal structure diagram of self-excited vibration device

1. 盖板 2. 大弹簧 3. 小弹簧 4. 限位管 5. 连接销 6. 滑块

产生推动作用, 进而对自激弹簧进行压缩, 产生所需的预紧力, 同时拧紧紧定螺母, 防止作业过程中的振动使预紧螺栓产生松动, 然后根据所需的耕深选择滑切型铲柄上合适的孔位与后连接板进行铰接, 同时通过螺栓将前后连接板固定在一起。深松装置作业时, 随深松深度的增加, 牵引阻力逐渐增大, 通过铰接销的杠杆作用, 牵引阻力从深松铲传递到滑块, 进而传递到自激弹簧, 使弹簧产生压缩, 由于土壤物理性质的不均匀性及拖拉机的振动等原因令深松铲产生变化的耕作阻力, 由此弹簧产生振动, 而限位管则限制了弹簧的最大压缩量, 当弹簧所受载荷快要达到弹簧的承受极限时, 滑块与限位管接触, 形成刚性连接, 从而阻止弹簧进一步压缩, 防止弹簧因变形过大而产生不可逆性的损坏。若深松铲突遇较大阻力, 超过了铰接销的承受极限, 则铰接销被剪断, 从而起到保护深松铲的作用。

## 2 关键部件参数设计

### 2.1 滑切型铲柄参数设计

#### 2.1.1 铲柄滑切角

深松铲柄有弧形深松铲、立柱型深松铲等结构形式, 不同的铲柄各有优缺点, 可适应不同的耕作环境, 针对长江中下游地区土壤质地黏重、杂草秸秆多

的特点需设计适合的深松铲柄。为此,以滑切原理为基础设计了滑切型深松铲柄,以便于铲柄对杂草和土壤具有滑切效应,从而可以减少杂草缠绕和牵引阻力。

铲柄刃口曲线上任意一点的法线与该点运动速度方向之间的夹角定义为滑切角,而滑切作用的大小主要取决于滑切角的选取<sup>[23-24]</sup>。因此,为获得理想的铲柄滑切角,通过建立运动学和动力学模型,求解产生滑切的临界条件。

如图3所示,以铲柄前进方向为x轴正方向,以耕深反方向为y轴正方向建立平面坐标系,以滑切质点G为研究对象,并将其置于铲柄刃口SS'与地面交接处。当铲柄前行时,滑切质点G的运动由铲柄对其产生的沿x轴的牵连运动和沿铲柄刃口向下的运动复合而成,由此可建立滑切质点G的动力学方程

$$\begin{cases} F_N - F_{fx} \cos\theta = ma_e \cos\theta \\ F_{fx} \sin\theta - F_{fr} = m(a_\tau - a_e \sin\theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F_N$ ——滑切质点受到铲柄刃口的法向力, N  
 $F_{fx}$ ——土壤对滑切质点沿x轴的摩擦力, N  
 $\theta$ ——铲柄滑切角, ( $^\circ$ )  
 $m$ ——滑切质点G的质量, kg  
 $a_e$ ——沿x轴方向的牵连加速度,  $m/s^2$   
 $F_{fr}$ ——滑切质点沿铲柄刃口切线方向的摩擦力, N  
 $a_\tau$ ——滑切质点沿铲柄刃口切线方向的加速度,  $m/s^2$

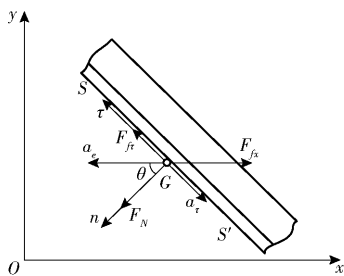


图3 铲柄滑切受力图

Fig. 3 Sliding cutting force diagram of shovel handle

滑切质点G在铲柄刃口SS'的作用下沿x轴反方向运动的趋势,而地面则对其具有反方向的摩擦力,若铲柄和滑切质点之间要产生相对滑动,则二者之间必有相对运动趋势,即

$$F_N \tan\varphi = F_{fr} \quad (2)$$

式中  $\varphi$ ——滑切质点与铲柄刃口的摩擦角, ( $^\circ$ )

将式(2)代入式(1)化简可得

$$F_N (\tan\theta - \tan\varphi) = ma_\tau \quad (3)$$

由式(3)可知,正常工作状态下法向力  $F_N > 0$ , 要使铲柄和滑切质点之间产生相对滑动,则滑切质

点的切向加速度必然大于零,即  $a_\tau > 0$ , 由此可得  $\theta > \varphi$ , 即滑切角要大于铲柄和滑切质点间的摩擦角。该摩擦角可能是铲柄和土壤的摩擦角,也可能是铲柄与杂草或秸秆的摩擦角,而其摩擦因数一般不超过0.6,对应的摩擦角约为  $31^\circ$ , 因此,铲柄的设计滑切角需大于该摩擦角。考虑到滑切角过小滑切效应不明显,滑切角过大会引起铲柄整体尺寸过大以及由此引发的强度不足和干涉等问题,因此设计滑切角  $\theta = 45^\circ$ 。

### 2.1.2 铲柄刃口角

铲柄刃口角是影响铲柄切割土壤及杂草的另一重要因素,刃口角过大会增大耕作阻力,降低铲柄的切割能力,过小会导致刃口易磨损,较优的刃口角范围为  $40^\circ \sim 45^\circ$ <sup>[14,25]</sup>。如图4所示,滑切型铲柄作业过程中实际的切土刃口角是水平刃口角,即铲柄法向刃口角在水平面内的投影角,而该水平刃口角也与上述所求的滑切角有重要关系,当滑切角  $\theta = 0^\circ$  时,实际切土的水平刃口角即为法向刃口角,由图4的几何关系可得

$$\begin{cases} \tan \frac{\beta_0}{2} = \frac{l_{FB}}{l_{AB}} \\ \tan \frac{\beta}{2} = \frac{l_{CD}}{l_{AC}} \\ l_{AB} = l_{AC} \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\beta_0$ ——法向刃口角, ( $^\circ$ )  
 $\beta$ ——水平刃口角, ( $^\circ$ )  
 $l_{AB}, l_{AC}, l_{CD}, l_{FB}$ ——两点之间的距离, mm  
 将式(4)化简可得

$$\beta = 2 \arctan \left( \cos\theta \tan \frac{\beta_0}{2} \right) \quad (5)$$

设计法向刃口角  $\beta_0 = 60^\circ$ , 代入式(5)可求得水平刃口角  $\beta$  为  $44.42^\circ$ , 符合刃口角取值要求。

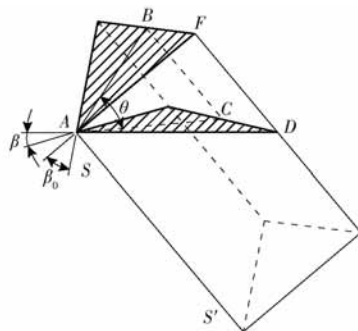


图4 刃口角示意图

Fig. 4 Diagram of cutting edge angle

## 2.2 自激振动弹簧参数设计

弹簧的参数设计须根据工作时所受载荷来进行,而深松作业时弹簧所受载荷并非直接等于深松铲的牵引阻力,作业时深松装置受力简图如图5所示。



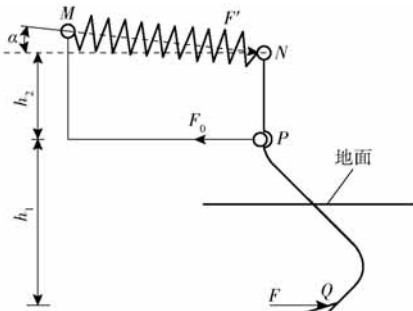


图5 深松装置受力简图

Fig.5 Force diagram of subsoiling device

$M$ 、 $N$ 、 $P$  为铰接点,可自由转动,由理论力学分析可得

$$F' = \frac{Fh_1}{h_2 \cos \alpha} \quad (6)$$

式中  $F'$ ——弹簧所受载荷, N

$F$ ——深松铲的牵引阻力, N

$h_1$ ——深松铲牵引阻力作用点  $Q$  到铰接点  $P$  的垂直距离, mm

$h_2$ ——弹簧所受载荷作用点  $N$  到铰接点  $P$  的垂直距离, mm

$\alpha$ ——弹簧轴线与水平面的夹角, ( $^\circ$ )

由于不同的安装孔位对  $h_1$ 、 $h_2$  及  $\alpha$  都有影响, 因此以最大的受力来计算弹簧所受载荷是可行的。深松铲的牵引阻力计算公式为

$$F = k_0 ab \quad (7)$$

式中  $k_0$ ——土壤比阻,  $\text{N}/\text{cm}^2$

$a$ ——深松深度, cm

$b$ ——扰动宽度, cm

取土壤比阻为  $5 \text{ N}/\text{cm}^2$ , 深松深度为  $30 \text{ cm}$ , 扰动宽度为  $60 \text{ cm}$ , 计算得  $F = 9000 \text{ N}$ ,  $h_1$  取值为  $510 \text{ mm}$ ,  $h_2$  取值为  $280 \text{ mm}$ , 此时  $\alpha$  为  $4.36^\circ$ , 代入式(6)可得弹簧所受最大载荷  $F' = 16440 \text{ N}$ , 因此, 弹簧的受力极限应超过该值。

参照文献[26], 自激弹簧的设计采用了大小双弹簧设计, 大弹簧在外, 小弹簧在内, 大弹簧直接靠弹簧套筒定位, 小弹簧则靠盖板和滑块上的阶梯轴定位, 以保证二者工作过程中互不干扰, 弹簧两端均并紧磨平。2种弹簧的主要结构参数如表1所示。

表1 自激弹簧参数

Tab.1 Parameters of self excited springs

弹簧类型	材质	线径 $d/\text{mm}$	中径 $D/\text{mm}$	自由长度 $H/\text{mm}$	节距 $t/\text{mm}$	弹性系数 $k/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
大弹簧	60Si2Mn	16	80	310	30	115
小弹簧	60Si2Mn	10	45	290	18	70

### 2.3 铲柄强度分析

为了检测铲柄的强度, 利用 ANSYS Workbench

有限元分析软件对铲柄进行了静力学分析, 结果如图6所示。深松铲所受载荷采用前文计算出的最大载荷  $9000 \text{ N}$ 。深松铲柄最大位移为  $4.68 \text{ mm}$ , 发生在铲尖连接部位, 最小位移发生在铲柄顶部。铲柄的最大应力位于铲柄连接部分与刃口交接处, 为  $269.56 \text{ MPa}$ , 小于材料的屈服极限  $784 \text{ MPa}$ , 最小应力同样位于铲柄顶部, 铲柄强度符合设计要求。

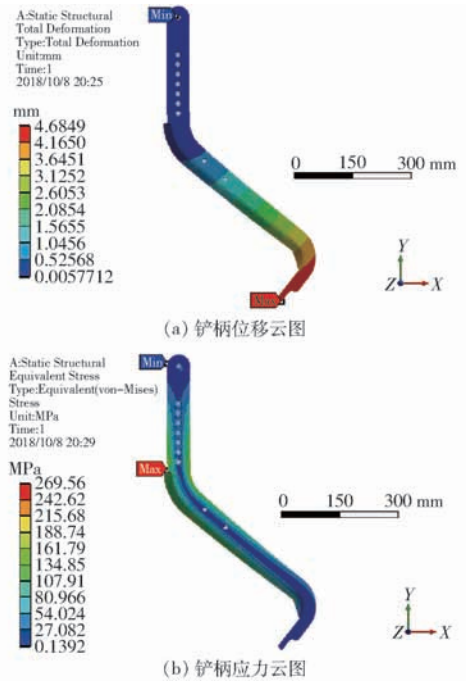


图6 滑切型铲柄有限元分析结果

Fig.6 Results of finite element analysis of sliding cutting shovel handle

### 3 土槽对比试验

为了检测滑切型自激振动深松装置的作业性能及减阻效果, 以牵引阻力为试验指标, 对滑切型深松铲自激振动连接与滑切型深松铲固定连接、弧形深松铲进行了对比试验, 试验在华中农业大学室内土槽实验室进行。

#### 3.1 试验设备与方法

室内土槽长度为  $40 \text{ m}$ , 宽度为  $2.5 \text{ m}$ , 试验台车由  $22 \text{ kW}$  变频电动机驱动, 台车运动速度范围为  $0.3 \sim 10 \text{ km}/\text{h}$ 。试验开始前5天对土壤进行洒水渗透, 之后对其进行旋耕破碎并用刮土板将土壤刮平, 最后由镇压辊进行镇压, 以保证土壤各处物理性质基本相同, 每次进行试验前都需重复旋耕、刮平及镇压操作, 以减小试验条件引起的试验误差。试验实际测得土壤含水率为  $17.71\%$ , 每次试验取土槽中间  $20 \text{ m}$  作为稳定测量区, 前后  $10 \text{ m}$  为缓冲区。

牵引阻力由 BK-5 型牵引力负荷传感器(中国航空空气动力技术研究院, 单个量程  $30 \text{ kN}$ , 精度等级:  $0.3$  级) 进行测量, 如图7所示, 试验数据由数据

采集箱采集,并由无线发射装置发送到接收计算机。每种形式的深松铲分别进行3个速度的测试,分别为2.0、2.5、3.0 km/h,深松深度固定为30 cm,每个作业工况进行3次重复,取3次平均值作为每个工况的试验结果。



图7 土槽测试装置

Fig. 7 Testing device in soil bin

1. 数据采集箱 2. 试验台车 3. BK-5型牵引力负荷传感器  
4. 深松铲

### 3.2 结果与分析

土槽对比试验所得牵引阻力、垂直阻力及相比于弧形深松铲减阻比如表2所示。

表2 不同速度下牵引阻力对比

Tab. 2 Comparison of traction resistance at different speeds

深松方式	速度/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	牵引 阻力/ kN	牵引阻 力减阻 比/%	垂直 阻力/ kN	垂直阻 力减阻 比/%
弧形深松铲	2.0	3.06		2.11	
	2.5	3.25		1.98	
	3.0	3.54		2.29	
滑切型深松铲 (固定连接)	2.0	2.82	7.79	1.40	33.62
	2.5	2.96	8.81	1.50	24.27
	3.0	3.23	8.73	1.49	34.94
滑切型深松铲 (自激振动 连接)	2.0	2.59	15.45	1.22	41.80
	2.5	2.70	16.97	1.37	30.47
	3.0	2.83	20.05	1.40	38.69

由表2可知,不同深松方式下,随速度的增加,牵引阻力逐渐增加,其中弧形深松铲增加量最大。滑切型深松铲(固定连接方式)在各速度下相比于弧形深松铲减阻7.79%~8.81%,减阻效果稳定;滑切型深松铲(自激振动连接方式)在各速度下相比于弧形深松铲减阻15.45%~20.05%,减阻效果明显,且随速度的增加,减阻比有增大的趋势。

不同深松方式下,垂直阻力受速度影响不大。固定连接方式滑切型深松铲垂直阻力在各速度下相比于弧形深松铲减阻24.27%~34.94%,自激振动连接方式滑切型深松铲垂直阻力在各速度下相比于弧形深松铲减阻30.47%~41.80%,滑切型深松铲的垂直阻力明显小于弧形深松铲,其主要原因为滑

切型铲柄对土壤有向前向下的滑切作用,因而土壤对铲柄有部分向上的反作用力,该反作用力抵消了部分垂直阻力,因此滑切型深松铲的垂直阻力较小。

弧形铲柄与滑切型铲柄深松后铲柄前的土壤堆积角如图8所示,弧形铲柄的土壤堆积角约为 $45^\circ$ ,而滑切型铲柄的土壤堆积角为 $29^\circ$ ,这也进一步证明了滑切型铲柄对土壤向下的滑切作用。

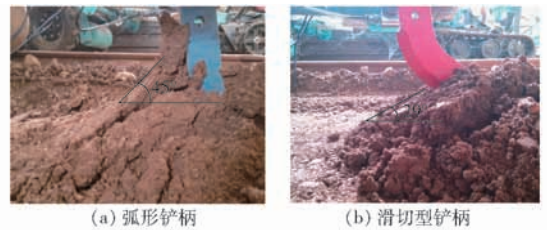


图8 铲柄前土壤堆积角

Fig. 8 Soil accumulation angle before shovel handle

## 4 田间性能试验

为了检测滑切型自激振动深松装置的田间作业性能,探究滑切型自激振动深松装置对土壤不同深度层级的坚实度、容重、含水率等物理特性的影响,以及对土壤的扰动情况,于2018年6月在华中农业大学现代农业科技试验基地进行了深松单铲田间试验。

### 4.1 试验条件与方法

试验田为冬闲置杂草田,田块长度为60 m,土壤为典型的长江中下游黏性土,土壤坚实度及容重等较大,具体参数如表3所示。试验主要测量仪器包括BK-5型牵引力负荷传感器、数据采集箱、带有动力学参数遥测软件的接收计算机、TJSD-750型土壤坚实度测定仪、环刀、干燥箱、电子秤、水平尺、卷尺、直尺等。

表3 作业前土壤参数

Tab. 3 Soil parameters before operation

深度/cm	坚实度/kPa	容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率/%
0~10	1 539.99	1.73	15.87
10~20	2 416.23	1.95	15.55
20~30	4 334.45	1.91	16.31

深松装置由拖拉机牵引,深松深度30 cm,由限深轮控制,调整好合适的弹簧预紧力后,拖拉机以2.5 km/h的速度前进。试验进行3个行程,每个行程取中间20 m作为稳定测量区,田间作业情况如图9所示。

### 4.2 结果与分析

#### 4.2.1 牵引阻力

各行程牵引阻力对比如图10所示。由图10可知,各行程牵引阻力均在一定范围内波动,其中行程

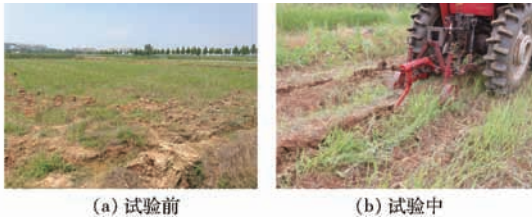


图9 田间试验

Fig. 9 Field experiment

1、2、3的牵引阻力均值分别为3.59、3.90、3.64 kN。田间试验的牵引阻力明显比土槽试验所得牵引阻力大,其主要原因为试验田块土壤类型为黏性土壤,且一段时间内没有种植作物,田块土壤坚实度及容重较大,而土槽中的土壤每次作业均需翻耕等操作,虽然对土壤进行了镇压,但仍达不到自然状态下土壤的状态,因此,田间试验牵引阻力大于土槽试验牵引阻力。

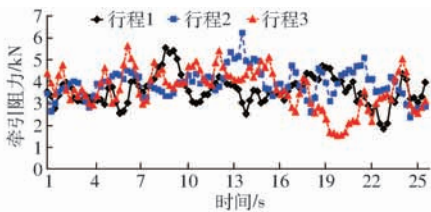


图10 各行程牵引阻力变化曲线

Fig. 10 Variation curves of traction resistance in each run

#### 4.2.2 土壤坚实度

土壤坚实度是土壤强度的一个综合指标,土壤坚实度过大影响土壤的透气透水和作物的根系发展,因此将土壤坚实度的降低率作为本次深松作业的一个重要指标。

各行程后由于深松沟中心部位土壤被铲柄挤到两边,虽有部分土壤回填,但基本上测不出土壤坚实度,因此以距离深松沟10 cm处作为土壤坚实度测量点,每个测量点同样测0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 3个深度,各深度深松后土壤坚实度变化如图11所示。由图11可知,土壤坚实度在各深度下明显减小。

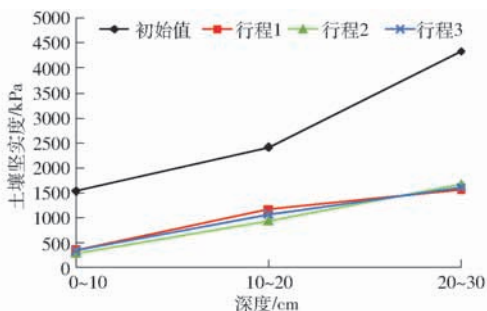


图11 各深度土壤坚实度变化曲线

Fig. 11 Changing curves in soil hardness at various depths

各深度下3个行程的土壤坚实度降低率如表4所示。由表4可知,在深松作业后0~10 cm、10~

20 cm、20~30 cm 3个深度的土壤坚实度降低率均超过50%。其中0~10 cm的土壤坚实度降低率最大,3个行程的平均降低率为78.18%;10~20 cm的土壤坚实度降低率最小,3个行程的平均降低率为56.08%;20~30 cm的土壤坚实度降低率在3个行程的平均值为62.72%。3个深度的土壤坚实度降低率有先减小后增大的趋势,其主要原因是由于滑切型自激振动深松装置所用铲尖为双翼型铲尖,对下部分土壤扰动较大,因此,20~30 cm的土壤坚实度降低率大于10~20 cm,又由于20~30 cm为犁底层区,初始土壤坚实度较大,所以深松后的土壤坚实度仍大于10~20 cm。

表4 土壤坚实度降低率

Tab. 4 Reduction rate of soil hardness

深度/cm	项目	坚实度/ kPa	降低率/ %	降低率 平均值/%
0~10	行程1	364.67	76.32	78.18
	行程2	296.33	80.76	
	行程3	347.33	77.45	
10~20	行程1	1 166.67	51.72	56.08
	行程2	943.33	60.96	
	行程3	1 074.00	55.55	
20~30	行程1	1 568.33	63.82	62.72
	行程2	1 674.33	61.37	
	行程3	1 605.67	62.96	

#### 4.2.3 土壤容重与含水率

土壤容重和含水率的变化率是深松作业的另一项重要指标,各深度深松后土壤容重和含水率的变化情况如表5所示。由表5可知,深松作业后各深度土壤容重变化明显,其中0~10 cm、10~20 cm土壤容重下降较大,分别为20.81%和20.51%,20~30 cm土壤容重下降较小,为14.66%,深松作业对土壤容重有较好的调节作用。各深度土壤含水率变化不大,0~10 cm土壤含水率略有下降,10~20 cm、20~30 cm土壤含水率略有上升,其主要原因为深松令表层土壤产生裂缝,以及深松沟的存在导致土壤走墒。

表5 土壤容重与含水率变化

Tab. 5 Changes of soil bulk density and moisture content

深度/cm	容重		含水率	
	数值/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	变化率/%	数值/%	变化率/%
0~10	1.37	20.81	15.75	-0.81
10~20	1.55	20.51	15.71	1.03
20~30	1.63	14.66	16.58	1.68

#### 4.2.4 土壤扰动系数及土壤蓬松度

土壤扰动系数和土壤蓬松度的计算需要测绘出



耕前的地表线和耕后土壤的扰动轮廓曲线,测量方式为将水平尺架在两边等高的支架上,水平尺中间对准深松沟中心位置,并令水平尺气泡处于中间位置,用钢直尺从水平尺中间位置开始向两边测量,每隔2 cm测量一个点,分别测量深松前和深松后的地表轮廓线,然后将松动的土壤完全扒出继续测量深松沟底轮廓,如图12a所示。在二维绘图软件中将所测数据还原成轮廓曲线,并以2 cm为单位画出网格,以网格所占面积近似代替扰动面积,由此计算土壤扰动系数和土壤蓬松度,如图12b所示。3个行程的土壤扰动系数均值为60.8%,土壤蓬松度均值为11.9%,根据作业要求,土壤扰动系数应大于50%,土壤蓬松度应小于40%,因此,深松作业质量满足要求。

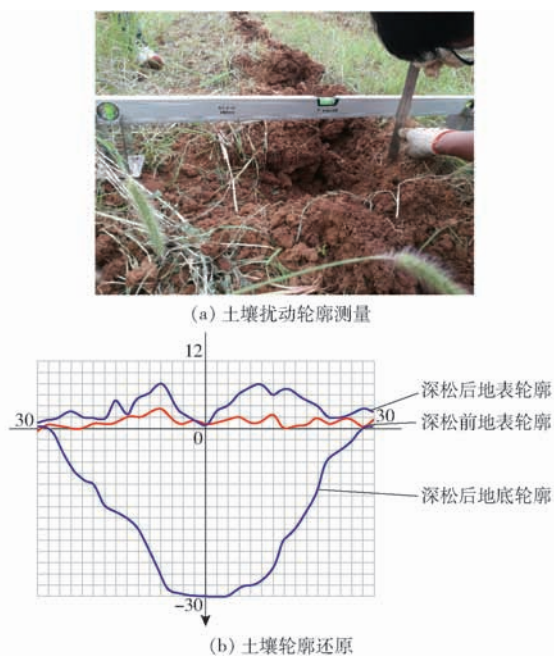


图12 土壤扰动系数及蓬松度测量

Fig.12 Measurement of soil disturbance coefficient and fluffiness

#### 4.2.5 深松深度及稳定性

3个行程下的深松深度均值为30.4 cm,变异系数均值为3.28%,深松深度稳定性系数均值为96.72%,深松深度符合要求,深松深度稳定性系数较高,可实现稳定耕深作业。

## 5 结论

(1)设计了一种滑切型自激振动减阻深松装置,主要包括利用滑切原理设计的滑切型铲柄及相应的自激振动装置,该深松装置具有滑切及自激振动双重减阻的效果。通过建立动力学方程对滑切型铲柄的重要参数滑切角进行了理论分析及参数设计,通过建立几何方程对铲柄的实际切土刃口角进行了分析及计算,自激振动装置采用了大小双弹簧的设计,该设计能有效减小自激振动装置及整个深松装置的尺寸,利用有限元分析软件对铲柄强度进行了分析,结果表明,设计满足要求。

(2)以牵引阻力为试验指标,对自激振动连接滑切型深松铲与固定连接滑切型深松铲、弧形深松铲进行了土槽对比试验,其中固定连接滑切型深松铲在各速度下相比于弧形深松铲减阻7.79%~8.81%,自激振动连接滑切型深松铲在各速度下相比于弧形深松铲减阻15.45%~20.05%,减阻效果明显。

(3)田间性能试验表明,深松牵引阻力大于土槽试验牵引阻力;深松后各深度下土壤坚实度下降显著,0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm深度下土壤坚实度降低率分别为78.18%、56.08%和62.72%;深松后各深度下土壤容重下降明显,减小范围为14.66%~20.81%,土壤含水率在0~10 cm略有下降,在10~20 cm和20~30 cm略有上升;土壤扰动系数均值为60.8%,土壤蓬松度均值为11.9%;深松深度及其稳定性系数符合指标,滑切型自激振动深松装置作业质量总体满足作业要求。

## 参 考 文 献

- [1] 张强,张璐,于海业,等.复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(8):61-65. ZHANG Qiang, ZHANG Lu, YU Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 61-65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120812&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120812&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.012. (in Chinese)
- [2] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等.深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(5):78-84. ZHANG Ruifu, YANG Hengshan, GAO Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 78-84. (in Chinese)
- [3] 宫秀杰,钱春荣,于洋,等.深松免耕技术对土壤物理性状及玉米产量的影响[J].玉米科学,2009,17(5):134-137. GONG Xiujie, QIAN Chunrong, YU Yang, et al. Effects of subsoiling and no-tillage on soil physical characters and coin yield[J]. J. Maize Sci., 2009, 17(5): 134-137. (in Chinese)
- [4] 何进,李洪文,高焕文.中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J].农业工程学报,2006,22(10):62-67. HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 62-67. (in Chinese)
- [5] 胡恒宇,李增嘉,宁堂原,等.深松和尿素类型对不同玉米品种水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2011,44(9):1963-1972.

- HU Hengyu, LI Zengjia, NING Tangyuan, et al. Effects of subsoiling and urea types on water use efficiency of different maize cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1963-1972. (in Chinese)
- [6] 孙亚朋, 董向前, 宋建农, 等. 振动深松机多组振动深松铲自平衡性能及仿真分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 92-99.  
SUN Yapeng, DONG Xiangqian, SONG Jiannong, et al. Self-balancing performance and simulation analysis of multi-group vibrating shovels of oscillatory subsoiler[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4): 92-99. (in Chinese)
- [7] 张祥彩, 李洪文, 何进, 等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1): 77-82, 71.  
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in Northern China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 1): 77-82, 71. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2013s115&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s115&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.015. (in Chinese)
- [8] HU H, NING T, LI Z, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen water use and yield of different varieties of maize in Northern China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142(3): 85-94.
- [9] SHAHGOLI G, FIELKE J, SAUNDERS C, et al. Simulation of the dynamic behavior of a tractor-oscillating[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(2): 147-155.
- [10] LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 177-185.
- [11] KORNÉL T, ISTVÁN J J, MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 134: 223-231.
- [12] 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.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140422&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.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)
- [13] 龚皓晖, 王霜. 仿生深松铲结构设计及有限元分析[J]. *农机化研究*, 2013, 35(7): 53-57.  
GONG Haohui, WANG Shuang. Bionic subsoiler structural design with the finite element analysis[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(7): 53-57. (in Chinese)
- [14] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 62-72.  
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 62-72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160910&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
- [15] 赵淑红, 王加一, 陈君执, 等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 82-92.  
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 82-92. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180211&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180211&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.011. (in Chinese)
- [16] 李霞, 付俊峰, 张东兴, 等. 基于振动减阻原理的深松机牵引阻力的试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 32-36.  
LI Xia, FU Junfeng, ZHANG Dongxing, et al. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 孙亚朋, 董向前, 宋建农, 等. 振动深松试验台作业参数减阻减振优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 43-49.  
SUN Yapeng, DONG Xiangqian, SONG Jiannong, et al. Parameter optimization of vibration subsoiler test bed for reducing resistance and vibration[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(24): 43-49. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] SHAHGOLI G, SAUNDERS C, DESBIOLLES J, et al. An investigation into the performance of vibratory tillage using straight and bent leg tines[J]. *Soil Management for Sustainability, Advances in Geoecology*, 2006, 39: 21-30.
- [21] 崔涛, 史智栋, 杨丽, 等. 弹簧预紧力可调式振动深松机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 96-102.  
CUI Tao, SHI Zhidong, YANG Li, et al. Design and experiment of vibration subsoiler with adjustable spring pre-tightening force[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 96-102. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s015&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s015&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.015. (in Chinese)
- [22] 张军昌, 闫小丽, 林泽坤, 等. 自激振动深松整地机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 44-49, 72.  
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, LIN Zekun, et al. Design and experiment of self-exciting vibration deep-loosening and subsoiling machine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 44-49, 72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160907&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160907&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.007. (in Chinese)
- [23] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选择[J]. *华中农学院学报*, 1982, 6(1): 64-69.  
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. *Journal of Huazhong Agricultural College*, 1982, 6(1): 64-69. (in Chinese)
- [24] 严霖元. 对农业机械工作部件滑切角的探讨[J]. *江西农业大学学报*, 1991, 13(1): 64-68.  
YAN Linyuan. An approach to the sliding cutting angle of the working parts of agricultural machinery[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 1991, 13(1): 64-68. (in Chinese)
- [25] 中国农业机械化科学研究院. *农业机械设计手册*[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 机械设计手册编委会. *机械设计手册*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.