

自激式振动深松整地机设计与试验

张军昌 闫小丽 林泽坤 朱瑞祥

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了减小深松耕作阻力、提高深松深度的稳定性,设计了一种入土角可控的自激式振动深松整地机。通过室内土槽对比试验优化了自激式振动深松装置的弹簧参数,验证了减阻效果,并对整机作业质量进行了田间测试。土槽试验表明:弹簧的性能参数对减阻效果有显著影响,当弹簧刚度为 194 N/mm 时,入土角可控自激振动深松可使牵引阻力下降 29.8%,自激振动条件下入土角可控较不可控牵引阻力下降 8.9%;田间试验结果表明:深松整地机作业后深松深度合格率达到 100%,稳定性系数达到 95.49%,土壤膨松度平均值为 19.34%,土壤干扰系数为 56.62%;机具作业后地表平整,碎土率平均值为 76.4%,通过性能良好,较好地满足了我国北方一年两熟区深松整地技术的要求。

关键词: 深松整地机;自激式振动;减阻;田间试验

中图分类号: S222.12⁺9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0044-06

Design and Experiment of Self-exciting Vibration Deep-loosening and Sub-soiling Machine

Zhang Junchang Yan Xiaoli Lin Zekun Zhu Ruixiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To reduce operating resistance and improve the stability of deep-loosening, a self-exciting vibration deep-loosening and sub-soiling machine with controllable cutting angle was designed. The range of the cutting angle was controlled in $19^{\circ} \sim 25^{\circ}$. To optimize parameters of elastic component and validate the effect of drag reduction, the experiment in the soil bin was carried out, furthermore, the field experiment of operation quality and performance of the machine was conducted. The experiment in soil bin showed that the parameter of elastic significantly affected the resistance reduction, when the stiffness of the elastic was 194 N/mm, the traction resistance can be reduced about 29.8%. Also the effect of elastic component parameters on the drag reduction was significant, and under the condition of self-exciting vibration, with controllable penetration angle, the traction resistance was decreased by 8.9% than that with uncontrollable penetration angle. The results of the field experiments showed that the qualified rate of sub-soiling depth was 100%, stability coefficient reached 95.49%, the average of soil fluffy and soil disturbance coefficient were 19.34% and 56.62% respectively, the land surface was flat after sub-soiling, and the average of the soil crushing rate was 76.4%. Moreover, the trafficability in the period of the test was good, and the machine met the subsoiling technical requirements in double-cropping area in northwest China.

Key words: deep-loosening and sub-soiling machine; self-exciting vibration; anti-drag; field test

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B00)

作者简介: 张军昌(1972—),男,讲师,主要从事旱区农业机械化装备研究,E-mail: zhangjunchang@126.com

通信作者: 闫小丽(1969—),女,副教授,主要从事旱区农业机械化装备研究,E-mail: yxl9212@nwsuaf.edu.cn

引言

机械化深松整地作业可以打破坚硬的犁底层,加深耕层,降低土壤容重,提高土壤通透性,从而增强土壤蓄水保墒和抗旱防涝能力,有利于作物生长发育和提高产量^[1-5]。实践证明,机械化深松整地是改善耕地质量,提高农业综合生产能力、促进农业可持续发展的重要举措^[6]。

振动式深松机可有效减少作业阻力^[7],主要分为驱动式、自激式两种类型。驱动式振动深松机虽然能显著降低牵引阻力^[8-10],但减阻的同时发动机须驱动振动部件发生振动。自激式振动深松机在深松铲上安装具有一定预紧力的弹簧,通过弹簧的压缩与伸展,使深松铲产生振动,可有效降低动力消耗^[11]。但由于自激式振动深松铲和弹性元件柔性相连,深松铲在作业过程中入土角不可控,使得减阻效果不明显,深松深度稳定性差。

深松后为了防止土壤水分蒸发,深松机加装了性能良好的碎土、合墒等装置^[12-13]。基于以上分析,本文设计一种集入土角可控、弹性减阻、碎土整地于一体,且结构简单紧凑的1SZ-190型深松整地机。

1 结构与工作原理

1SZ-190型深松整地机主要由入土角可控自激振动深松装置、机架和碎土整地装置3部分组成,深松铲前3后2布置,如图1所示。整机以三点悬挂方式与拖拉机相连,配套动力为67 kW,一次性完成深松与整地两项作业。

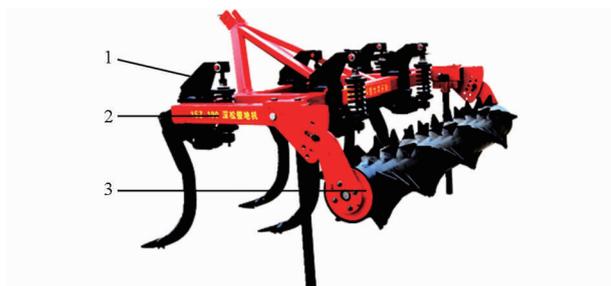


图1 1SZ-190型深松整地机结构图

Fig. 1 Structure diagram of 1SZ-190 deep-loosening and sub-soiling machine

1. 深松装置 2. 机架 3. 碎土整地装置

1.1 入土角可控振动深松装置结构与工作原理

入土角可控自激振动深松装置组成如图2所示,主要由弹性减阻单元、固定部件和深松部件3部分组成。该装置由上下固定板通过螺栓固定在机架上,深松铲通过过载保护销和铰链与杠杆相连。深松铲未入土时,调节预紧螺母,减振弹簧推动滑块沿

着摆杆向下滑动,带动杠杆绕主销钉逆时针转动,使杠杆与下固定板右侧接触,深松铲的最小入土角被限制在此位置。深松铲入土后,受土壤阻力的影响,深松铲带动杠杆绕主销钉顺时针转动,当耕作阻力过大时,杠杆和下固定板左侧接触,深松铲的入土角被限制到最大值。通过此装置将深松铲的入土角控制在最佳的入土角范围内并实现自激振动弹性减阻。研究表明^[14]:深松作业入土角约为 23° 时,深松作业阻力最小。经过土槽试验,最终确定深松铲入土角范围为 $19^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 。

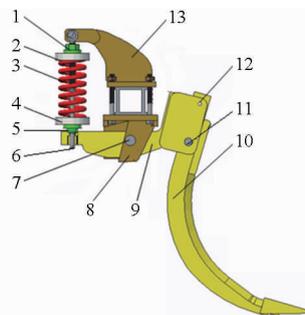


图2 自激振动深松装置结构简图

Fig. 2 Structure diagram of self-exciting vibration deep-loosening machine

1. 预紧螺母 2. 弹簧上支撑座 3. 减振弹簧 4. 弹簧下支撑座
5. 滑块 6. 摆杆 7. 主销钉 8. 下固定板 9. 杠杆 10. 深松铲
11. 过载保护销 12. 铰链 13. 上固定板

当土壤阻力急剧增大,超过过载保护销的设计要求时,过载保护销被剪断,深松铲从土壤里脱出,防止整机由于过载而产生结构性破坏。

1.2 碎土整地装置结构

碎土整地辊为锯齿形整地辊如图3所示,为避免整地过程中发生多边形效应而产生振动,锯齿轧片沿滚筒表面轴向等间距螺旋旋转 180° 分布排列。

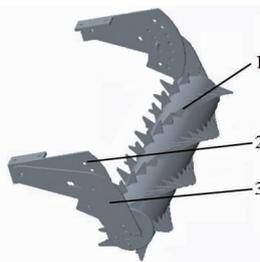


图3 碎土整地装置结构简图

Fig. 3 Structure of the crushing and sub-soiling device

1. 碎土整地辊 2. 调节盘 3. 调节拉杆

针对不同的作业需求,碎土整地装置设计为可拆卸式。仅需深松作业时,碎土整地装置可通过拆卸固定螺栓卸下。调节盘上端固定在机架上,其上设计有多个按一定角度规律分布的限位孔。调节拉杆下端与碎土整地辊轴承连接,在作业时,通过调节拉杆固定在调节盘上的位置实现深松深度调节。

2 主要工作部件设计

2.1 减振弹簧的选型

振动弹簧是自激振动深松装置的关键部件,弹簧性能参数直接影响着深松装置的减阻效果。由深松铲入土角范围可计算出弹簧的压缩行程 $f = 44 \text{ mm}$, 弹簧的最大受力 $F_2 = 5500 \text{ N}$, 弹簧的预紧载荷 $F_1 = 1500 \text{ N}$, 所承载荷为动载荷, 则所需弹簧的最小刚度 F'_{\min} 为

$$F'_{\min} = \frac{F_2 - F_1}{f} = 90.9 \text{ N/mm} \approx 91 \text{ N/mm} \quad (1)$$

依据深松装置的结构尺寸, 安装空间弹簧的自由高度 H_0 不超过 250 mm , 弹簧的外径 D_1 不超过 100 mm , 查表可得有 3 种弹簧满足要求^[15], 分别命名为 I、II、III 号弹簧, 弹簧材料为 60Si2Mn, 类型为 YI 型结构。相关参数如表 1, 通过对比试验进行优化选型。

表 1 弹簧参数

Tab. 1 Parameters of spring

编号	材料直径 d/mm	弹簧中径 D/mm	自由高度 H/mm	刚度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	最大允许变 形量/ mm
I	14	85	220	95	79
II	16	80	220	194	61
III	18	75	220	378	48

2.2 深松铲设计

深松铲柄形式主要有垂直立柱式铲柄、弧形铲柄、弯形铲柄等结构。深松机在北方旱地作业, 必须要考虑到杂草的影响, 垂直立柱式和弯形铲柄容易挂草, 而弧形铲柄则可以很大程度上消除该现象, 据此, 选择弧形铲。当纵深比 L/D 为 $0.68 \sim 1.04$ 时^[16], 深松铲的耕作阻力较小, 本设计选纵深比为 0.9 。为提高深松铲对土壤的犁削破碎性能, 破土刃口段横截面设计为楔形, 刃口夹角为 60° , 如图 4 所示。铲柄总长 1000 mm , 最大入土深度 400 mm , 下端入土角 23° , 铲柄厚度 30 mm , 铲柄宽度 68 mm 。铲尖结构参数及铲柄其他结构参数参照 JB/T 9788—1999^[17]。

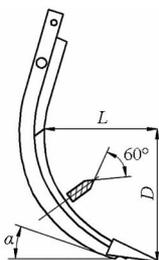


图 4 深松铲结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of deep-loosening shovel

2.3 整地碎土辊设计

整地碎土辊的功能是对深松后的表土进一步加工, 破碎土块, 对土壤下层进行压实, 使表层土壤细碎。整地碎土辊半径 r 的确定^[18-19]: 由于碎土辊作业深度 h 一般为 $20 \sim 30 \text{ mm}$, 取 $h = 30 \text{ mm}$; 为避免整地机在整地过程中发生多边形效应而产生振动, 锯齿轧片在辊筒轴向螺旋线布置, 刀片数可取 5 片。为使碎土辊有较好的工作性能, 在土层内作业的锯齿轧片以 1 片或 2 片为宜, 由图 5 可知

$$\cos 36^\circ = \frac{r-h}{r} \quad (2)$$

则 $r = 30 \text{ mm}$ 。

锯齿轧片高度需大于 $2.5h$, 取 80 mm , 由于锯齿轧片数目在每个铲间距内不宜少于 3 片, 故本设计在 4 个铲间距内共有 17 个钉齿轧片, 滚筒全长 2 m 。

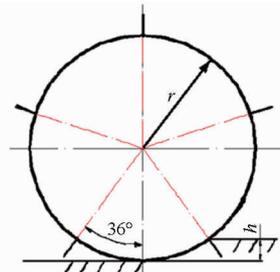


图 5 整地碎土辊半径分析图

Fig. 5 Radius of crushing roll

3 试验

3.1 深松装置土槽试验

3.1.1 试验目的

为了验证入土角可控自激振动深松装置减阻效果和自激振动条件下入土角可控对耕作阻力的影响, 探明自激振动弹簧的主要性能参数对牵引阻力的影响, 在西北农林科技大学数字化土槽试验台上 (图 6) 进行了室内土槽牵引阻力测试。



图 6 土槽试验装置

Fig. 6 Testing device in soil bin

3.1.2 试验设备与方法

本次土槽试验中深松铲动力牵引设备为哈尔滨博纳科技有限公司研制的电力变频四轮驱动土槽试

验车,通过安装的横向导向轮,试验车在已建成的土槽两旁的轨道上可保持直线行驶。

试验所选用的土壤来自陕西省关中地区农田土壤,属黄土母质发育的农业土壤,颗粒均匀,疏松绵软。为保证试验中土壤状态与田间相同,试验前3 d对土槽内的土壤浇水之后进行旋耕,保证土壤均匀平整、水分渗透。然后将土槽内的土壤分成两部分进行处理,将土壤表面以下200 mm深的土壤人工挖出,剩余土壤铺平,使用电动冲击夯将剩余部分土壤压紧一次,接着将挖出的土壤均匀回填铺平,再用旋耕机将土壤旋平之后用整地辊重复压实10次,使土壤的含水率达到14%~17%,300~400 mm土层土壤坚实度达到1 400~1 500 kPa。

深松铲试验装置通过三点悬挂装置与土槽车相连接,获取牵引阻力信号的传感器布置于左右悬挂装置及上拉杆上,并与无线设备相连,工作过程中将实时信号发送给计算机。在无弹簧的情况下将深松铲与机架固连,入土角调整为 24° ,在入土角可控的条件下选牵引阻力最小的弹簧,进行自激振动下入土角可控与不可控对减阻效果的对比试验。试验前3种弹簧刚度用万能试验机进行了标定,弹簧线性良好。

测试速度为3 km/h,试验区前5 m为加速区,后5 m为减速区,中间10 m为稳定测试区,测试项目进行3次重复试验,取其平均值,试验结果见表2。

表2 牵引阻力试验数据

Tab.2 Data of traction resistance test

参数	无弹簧	I	II	III	IV
入土角 $\alpha/(^\circ)$	24	可控	可控	不可控	可控
平均值 \pm	4 779 \pm	3 885 \pm	3 357 \pm	3 656 \pm	4 560 \pm
标准偏差/N	258 ^a	194 ^b	162 ^c	188 ^d	226 ^e
阻力下降程度/%		18.7	29.8	23.5	4.6

注:同一行中不同的字母表示差异极显著($P < 0.01$)。

3.1.3 土槽试验结果分析

试验数据表明,在入土角可控条件下安装振动弹簧作业相对于无弹簧状态牵引阻力明显变小,牵引阻力分别下降18.7%、29.8%、4.6%,说明用弹簧激振减阻效果明显。其中II号弹簧减阻效果最好,明显优于III、I号弹簧,原因是I号弹簧刚度较小,深松装置在作业过程中有部分时间深松铲已达到入土角最大位置,深松铲与机架接触,减振弹簧不起作用,减阻效果下降,但较无弹簧好,III号弹簧由于刚度过大,振动频率小,降低了弹性减阻效果。

采用II号弹簧入土角可控与不可控对比试验表明(图7),自激振动条件下入土角可控相对于不可控牵引阻力下降8.2%,说明自激振动条件下将入

土角控制在最佳范围会减小耕作阻力。试验数据表明3种弹簧对牵引阻力有显著影响,说明在自激式振动减阻深松装置中,弹簧的刚度对减阻效果有较大的影响。

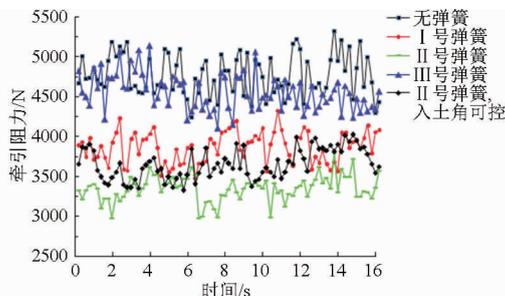


图7 牵引阻力曲线

Fig.7 Curve of traction resistance

3.2 整机田间试验与结果分析

2015年9月15日在陕西省武功县农田进行了1SZ-190型深松整地机作业质量试验(图8),试验地总面积 2 hm^2 ,试验地为小麦玉米一年两熟轮作,小麦收获后高留茬机械收获,玉米成熟后茎穗兼收。在机具深松前检测试验地0~40 cm土层土壤平均容重为 1.2 g/cm^3 、土壤平均含水率为20.3%、留茬高度为31.8 cm、地表植被覆盖量为 0.11 kg/m^2 ,且大多为小麦秸秆和玉米根茬。



图8 田间测试

Fig.8 Field test

深松整地作业中东方红1204型拖拉机以高1挡作业,作业速度为1.74 km/h;深松整地后检测土壤4个工作行程的深松深度、膨松度、扰动系数、碎土率、深松稳定性等参数。为了保证试验的稳定性,50 m试验测试区两端分别设置了20 m稳定区和结束区。

3.2.1 深松深度测试及结果分析

检测点应避开地头地边,每一个作业行程随机取3个检测点,每2个检测点应至少间隔10 m以上,在每个检测点沿作业方向2 m范围内随机取3个点,测取每点每个深松铲的深松深度。在检测点上用钢板尺分别测量暄土厚度与浮土厚度,要求测量精度为5 mm。暄土厚度测量:将一把直尺水平放置在作业后的地表面上作为测量基准,用另一把钢板直尺垂直插入深松沟底,插入深度即为暄土厚

度。浮土高度测量:将水平放置在地表面的直尺一段伸至未耕地,用钢板直尺垂直测量未耕地至水平直尺之间的距离即为浮土厚度。深松深度为浮土厚度与暄土厚度的差值,测试数据计算整理后见表3。

表3 深松深度测试结果

Tab.3 Result of deep loose depth

项目	暄土厚度/cm	浮土厚度/cm	深松深度/cm	变异系数/%	稳定性系数/%
行程1	40.9	7.0	33.9	4.72	97.62
行程2	38.3	5.2	33.1	3.84	93.36
行程3	38.6	5.9	32.7	5.11	96.40
行程4	40.2	4.6	35.6	4.35	94.57
平均值	38.8	5.0	33.8	4.51	95.49

所测深松深度都大于 GB/T 24675.2—2009 的要求^[20],深松深度合格率达到100%。从表3中可以看出,作为评价深松机作业性能重要参数的稳定性系数平均达到了95.49%,变异系数平均为4.51%,实际平均深松深度也在300~400 mm,1SZ-190型深松整地机符合深松机整地性能检测要求。

3.2.2 土壤膨松度和扰动系数测定及结果分析

作业前在垂直于机组前进方向上测量未耕地地表线,深松整地作业后在同一条线上测得已耕地地表线,然后去掉浮土和深松动土,测得深松沟底线,将测量数据导入制图软件得到剖面图,并求得:耕后地表至理论深松沟底的横断面积 A_h ;耕前地表至理论深松沟底的横断面积 A_q ;耕前地表至实际深松沟底的横断面积 A_s 。每一个行程测定1次,每个测点测取2个深松行,如图9所示。土壤扰动系数 p 和土壤膨松度 y 计算式为

$$p = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \quad (3)$$

$$y = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \quad (4)$$



图9 土壤膨松度和扰动系数测定

Fig.9 Determination of soil bulkiness and disturbance coefficient

根据深松整地作业质量标准评定指标^[21],作业后的土壤膨松度应不大于40%,土壤扰动系数应不小于50%,并将4个行程的测定值进行汇总计算,计算结果如表4所示。

表4 土壤膨松度和扰动系数试验数据

Tab.4 Data of soil bulkiness and soil disturbance coefficient test

项目	A_h/cm^2	A_q/cm^2	A_s/cm^2	土壤膨松度/%	土壤扰动系数/%
行程1	1 359.67	1 137.33	671.67	19.55	59.06
行程2	1 073.00	883.33	512.33	21.47	58.00
行程3	1 293.67	1 073.00	585.33	20.56	54.55
行程4	999.00	863.00	473.33	15.76	54.85
平均值	1 181.33	989.00	560.67	19.34	56.62

试验结果表明,4个行程的土壤膨松度平均值为19.34%,土壤扰动系数平均值为56.62%,两项指标均满足深松整地作业质量评定指标的规定值,表明1SZ-190型深松整地机的作业效果良好。其中第2行程第2、3铲作业前后剖面图如图10所示,土壤剖面均近似呈倒三角型,形成虚实相间的作业带,有利于土壤蓄水保墒。深松铲底部深松宽度小,有利于打破犁底层;而距离地表较近的土壤扰动区域略宽,并经整地辊整理后能大范围疏松表层土壤,对作物根系生长十分有利。

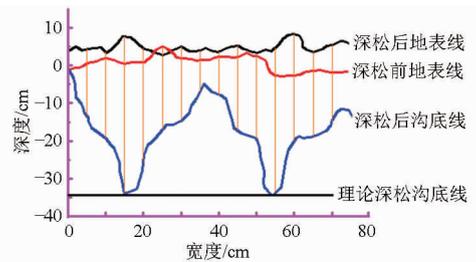


图10 土壤剖面图

Fig.10 Soil profile map

3.2.3 耕后碎土率

在测区内按5点法测试点,每点选取的检测点面积为500 mm×500 mm;在200 mm耕层内,分别称量最长边小于40 mm的土块质量和200 mm耕层内土壤总质量,两者之比则为该测试点的碎土率,计算5个点的平均值作为该区的碎土率,如图11所示。



图11 耕后碎土率测定

Fig.11 Determination of soil crushing rate

试验测得碎土率平均值为76.4%,满足深松整地作业质量要求。

在整个试验过程中深松装置未出现堵塞,整地

碎土辊没有壅土现象,说明整机通过性良好。

4 结论

(1)设计了一种入土角可控自激振动深松整地作业机,自激振动深松装置的入土角可控,使深松铲始终工作在最优入土角 $19^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 范围内。

(2)对自激振动的弹性元件进行了选型设计和室内土槽对比试验研究,试验表明:当弹簧的刚度为 194 N/mm 时,采用入土角可控自激振动深松可使

牵引阻力下降 29.8% ,自激振动条件下入土角可控相对于不可控牵引阻力下降 8.9% ,弹簧的性能参数对深松作业的减阻效果有显著影响。

(3)对 $1\text{SZ}-190$ 型深松整地机进行了田间试验,试验结果表明:深松深度合格率达到 100% ,稳定性系数达到 95.49% ,性能较好;土壤膨松度平均值为 19.34% ,土壤扰动系数平均值为 56.62% ,碎土率平均值 76.4% ,通过性能良好,满足深松整地作业质量要求。

参 考 文 献

- 高焕文,李洪文,李问盈.保护性耕作的发展[J].农业机械学报,2008,39(9):43-48.
GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying. Development of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):43-48. (in Chinese)
- 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)
- 郑侃,何进,李洪文,等.中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J].农业工程学报,2015,31(22):7-15.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in northern China [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22):7-15. (in Chinese)
- 王长生,王遵义,苏成贵,等.保护性耕作技术的发展现状[J].农业机械学报,2004,35(1):167-169.
WANG Changsheng, WANG Zunyi, SU Chenggui, et al. Development and application of protective farming technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1):167-169. (in Chinese)
- 何润兵,李传友,王明武,等.深松对土壤理化性质和冬小麦生长特性的影响[J].中国农机化学报,2014,35(2):119-122.
HE Runbing, LI Chuanyou, WANG Mingwu, et al. Effects of subsoiling on soil physical and chemical properties and growth characteristics of winter wheat [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2):119-122. (in Chinese)
- 贾洪雷,马成林,刘昭辰,等.北方旱作农业区蓄水保墒耕作模式研究[J].农业机械学报,2007,38(12):190-194.
JIA Honglei, MA Chenglin, LIU Zhaochen, et al. Overview of study on the tillage mode of water storage and soil moisture conservation for dry farming region in northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12):190-194. (in Chinese)
- GHOLAMHOSSEIN Shahgoli, JOHN Fielke, JACKY Desbiolles, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage [J]. Soil & Tillage Research, 2010, 106(2):202-210.
- 辛丽丽,李传琦,梁继辉,等.考虑分段土壤作用力的振动减阻分析[J].农业机械学报,2014,45(2):136-140.
XIN Lili, LI Chuanqi, LIANG Jihui, et al. Vibrating drag reduction considering acting force of piecewise soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):136-140. (in Chinese)
- 蒋建东,高洁,赵颖娣,等.土壤旋切振动减阻的有限元分析[J].农业机械学报,2012,43(1):58-62.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):58-62. (in Chinese)
- 李艳龙,刘宝,崔涛,等.1SZ-460型杠杆式深松机设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(9):37-40.
LI Yanlong, LIU Bao, CUI Tao, et al. Design and field experiment on 1SZ-460 lever-type subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):37-40. (in Chinese)
- 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)
- 杨有刚,张宏,冯涛,等.土壤浅深松联合松耕机设计和浅松土试验[J].机械工程学报,2012,48(19):163-167.
YANG Yougang, ZHANG Hong, FENG Tao, et al. Topsoil and subsoil combined cultivator and top-soiling experiment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19):163-167. (in Chinese)
- 黄玉祥,杭程光,李伟,等.深松作业效果试验及评价方法研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(11):229-234.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, LI Wei, et al. Subsoiling test and evaluation methodology of tillage quality [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(11):229-234. (in Chinese)

- 30 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[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)
- 31 权龙哲. 玉米根茬收获模式及采收机理[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
QUAN Longzhe. Corn stubble harvest mode and mechanisms[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 32 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38-42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38-42. (in Chinese)
- 33 胡建平, 周春健, 侯冲, 等. 磁力板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 94-98.
HU Jianping, ZHOU Chunjian, HOU Chong, et al. Simulation analysis of seed filling performance of magnetic plate seed metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94-98. (in Chinese)
- 34 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 165-171.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 165-171. (in Chinese)
- 35 MUSTAFA Ucgul, JOHN M Fielke, CHRIS Saunders. Three dimensional discrete element modeling DEM of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- 36 MUSTAFU Ucgul, JOHN M Fielke, CHRIS Saunders. 3D DEM tillage simulation validation of a hysteretic spring plastic contact model for a sweep tool operating in cohesionless soil[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144(4): 220-227.
- 37 KORNAL Tamas, ISTVAN J Jori, Abdul M Mouazen. Modelling soil sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134(8): 223-231.
- 38 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆土壤旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)
- 39 BENKENSTEIN H, LINDNER H. Shear strength internal friction and friction between soil and metal in different soil types as affected by moisture content[J]. Albrecht Thaer Arch, 1969, 13: 351-359.
- 40 余友泰, 蒋建鹏. 土壤作物种实和各种脱出物对钢板铸铁和木板等的摩擦系数的测定[J]. 东北农学院学报, 1957(1): 1-11.
- 41 DG/T 026—2012 深松机[S]. 2012.
- 42 乔晓东, 王晓燕, 颜华, 等. 后悬挂农具田间试验平台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 63-68.
QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyang, YAN Hua, et al. Field experiment platform for rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 63-68. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 49 页)

- 14 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)
- 15 GB/T 2089—2009 普通圆柱螺旋压缩弹簧尺寸及参数(两端圈并紧磨平或制扁)[S]. 2009.
- 16 郭志军, 杜干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47-51.  
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47-51. (in Chinese)
- 17 JB/T 9788—1999 深松铲和深松铲柄[S]. 1999.
- 18 王序俭, 黄玉芳, 秦朝民. 1LZ-5.4 联合整地机的试验与研究[J]. 农业机械学报, 1996, 27(增刊): 15-18.  
WANG Xujian, HUANG Yufang, QIN Chaomin. Theoretical and experimental research on 1LZ-5.4 tillage combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(Supp.): 15-18. (in Chinese)
- 19 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.
- 20 GB/T 24675.2—2009 保护性耕作机械深松机[S]. 2009.
- 21 JB/T 10295—2001 深松整地联合作业机[S]. 2001.