

弹簧预紧力可调式振动深松机设计与试验

崔涛 史智栋 杨丽 王云霞 韩丹丹 张东兴

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了减小深松机的耕作阻力和拖拉机的动力消耗,增强深松机对不同类型土壤的适用性,设计了弹簧预紧力可调式自激振动深松机。在机具工作过程中,通过自激振动单元的振动作用,可有效减小深松机的牵引阻力;通过弹簧预紧力调节机构可改变弹簧的预紧力,以适应不同物理特性的土壤,获得理想的深松效果。田间试验表明在保证耕深的前提下,合适的弹簧预紧力可有效减小机具的耕作阻力。为了测试该深松机的减阻性能,设计了2.5、3.2、4.0 km/h 3种作业速度和250、300、350 mm 3种深松深度,进行了两因素三水平的全因素试验,试验结果表明:在不同作业速度与深松深度下,与非振动深松机相比,该深松机均能有效减小牵引阻力,减阻比为10.30%~22.65%;对不同作业速度和深松深度下的振动深松牵引阻力和非振动牵引阻力进行了方差分析。结果表明作业速度、耕作深度和机具类型对深松机工作阻力均有显著性影响,在不同作业速度下,由于自激振动单元的减阻作用,随着耕作深度的增加,振动深松牵引阻力增加速度小于非振动深松。

关键词: 深松机; 自激振动; 弹簧; 预紧力可调; 设计; 试验

中图分类号: S222.12⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)S0-0096-07

Design and Experiment of Vibration Subsoiler with Adjustable Spring Pre-tightening Force

Cui Tao Shi Zhidong Yang Li Wang Yunxia Han Dandan Zhang Dongxing

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reduce working resistance and power consumption of subsoiler, and improve the applicability to different soil, 1SZ-600 self-excited vibration subsoiler characterized by adjustable spring pre-tightening force was designed. The main part of the self-excited vibrating subsoiler was tension spring, parameters of the spring were determined through subsoiler overall structure and springs location. Working resistance reduction was achieved by self-excitation vibration unit. The pre-tightening force of spring was changeable according to soil mechanical properties. Field experiment was conducted in Gu'an County, Hebei Province. Experimental factors included working depth of 250 mm, 300 mm and 350 mm, operating speed of 2.5 km/h, 3.2 km/h and 4.0 km/h. Results showed that to ensure the premise of deep tillage, selecting appropriate spring preload can effectively reduce the traction resistance. The draft resistance was decreased by 19.26%, 15.43% and 22.65% at working depth of 25 cm, 30 cm and 35 cm with working speed of 2.5 km/h, respectively. When the working speed was 4 km/h, draft resistance was decreased by 10.3%, 13.9% and 21.4%, respectively. Traction resistance reduction was obvious with higher working speed and it was decreased by 10.30%~22.65% compared with non-vibrating subsoiler at any speeds and working depths. Variance analysis was conducted to ensure the significant influence of test factors. Results showed that working speed, tillage depth and machine structures had significant influence on the traction resistance. The increase rate of the traction resistance of vibration was less than that of non vibration with the increase of tillage depth at different operating speeds due to drag reduction of a self-excited vibration unit.

Key words: subsoiler; self-excited vibrating; spring; adjustable spring pre-tightening force; design; experiment

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-20

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503116)、国家现代玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)和农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室项目

作者简介: 崔涛(1985—),男,讲师,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: cuitao850919@163.com

通信作者: 张东兴(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: zhangdx@cau.edu.cn

引言

我国耕地由于多年的旋耕碾压,导致土壤耕层厚度减小,有效耕层深度只有 16 cm 左右;犁底层深度为 15 ~ 30 cm,厚度约为 15 cm。犁底层抑制了农作物根系向下生长,减少了农作物对养分和水分的吸收,阻碍了农作物根系各项正常的新陈代谢和其他功能,使作物的生长受到制约,这些都会对粮食增产造成负面影响^[1-4]。

深松技术能够打破犁底层,消除土壤压实,加深耕作层,降低土壤容重,增加土壤的通透性,提高土壤防涝、抗旱能力^[5-6]。深松技术可以改良土壤,利于作物增产^[7-10]。

国外的深松机主要以联合作业为主,其特点是机具幅宽较大、作业速度快、效率高,与大功率拖拉机配套;机具以自激式振动深松机为主,弹性原件多为压缩式弹簧或者液压缸。我国的深松机多为轻简型,以适合小地块作业为主,且目前农村地区缺乏大功率拖拉机,因此机具对于减阻性能有较大需求^[11-12]。国内部分学者研究了强迫式振动深松机,作业时需要拖拉机动力输出轴带动振动机构完成作业,虽然能够降低牵引阻力需求,但实际上是对拖拉机动力的二次分配,由于牵引阻力降低减少的动力分配给了动力输出轴,并且若动力机具选择不当,振动发生机构产生的振动会传递给驾驶员,影响驾驶舒适度^[13-15]。

本文设计 1SZ-600 型自激式振动深松机的整机结构,并阐述其工作原理,最后通过田间试验验证深松机的工作性能。

1 深松机结构设计

1.1 深松机整体结构

1SZ-600 型自激式弹簧预紧力可调式自激振动深松机主要由三点悬挂装置、机架、限深轮总成、镇压轮总成、自激振动单元组成,如图 1 所示。机具通过三点悬挂装置与拖拉机连接;限深轮总成通过 U 型螺栓固定在机架的两侧,实现深松机耕作深度的实时调节;自激振动单元作为深松机的核心部件,采用前二后三的布置方式通过螺栓固定在机架上,调节螺栓在机架上的位置可以改变深松铲的预紧力。

1.2 自激振动单元设计

振动耕作主要是利用振动耕作单体的振动作用达到节能、减阻和提高作业质量的目的^[15-17]。深松机自激振动主要是由于土壤地表不平引起的耕深变化或者土壤力学性质不均匀、土壤杂物等原因引起

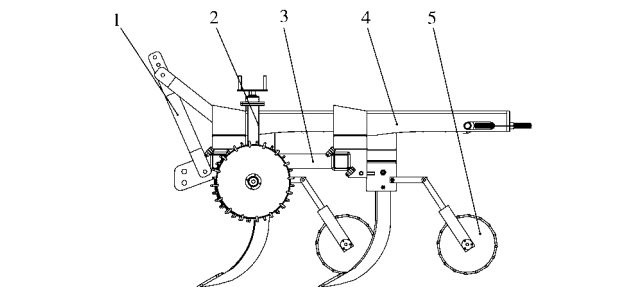


图 1 1SZ-600 型自激式振动深松机
Fig. 1 1SZ-600-type self-excited vibration subsoiler
1. 三点悬挂装置 2. 限深轮总成 3. 机架 4. 自激振动单元
5. 镇压轮总成

的土壤阻力变化以及由拖拉机发动机振动引起的悬挂或牵引系统的振动。这种振动冲击和压实土壤作用小、耗能低^[18-19]。

本文设计的自激振动单元如图 2 所示,自激振动单元主要由拉伸弹簧、羊角钩子、橡胶垫、座体、深松铲、弹簧罩、调节销轴、调节螺母、调节丝杠等部件组成。弹簧通过钩子一端与羊角钩子挂接,另一端与调节销轴挂接;橡胶垫对深松铲有限位作用,保证深松铲的入土深度不受土壤物理特性的影响,在耕作中当土壤阻力大于弹簧预紧力时,拉伸弹簧,在弹簧复位的过程中,橡胶垫有缓冲的作用,减小对座体连接板的冲击力,同时也保证了深松机的耕作深度前后一致。在机组工作时,预紧力调节装置首先将弹簧预紧力调整到预定值,耕作单体随拖拉机牵引前行,深松铲尖入土作业,机具耕作中由于耕深变化、土壤力学性质不均匀、土壤有杂物等原因使土壤对深松机构的作用力不断发生变化^[20],当深松机的耕作阻力大于弹簧预紧力时,弹簧受到拉伸,铲柄绕着销轴套摆动,此时铲尖会有一定程度的抬升,机具耕作阻力减小,弹簧恢复初始状态,如此弹簧形成了拉伸-恢复的连续循环,保证机器作业的可靠性。

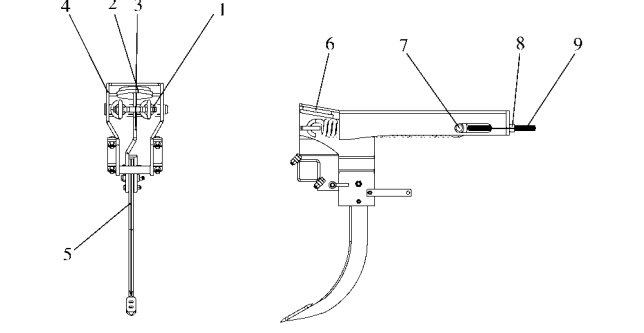


图 2 自激振动单体主视图与侧视图
Fig. 2 Front and side views of self-excited vibration monomer

1. 拉伸弹簧 2. 羊角钩子 3. 橡胶垫 4. 座体 5. 深松铲
6. 弹簧罩 7. 调节销轴 8. 调节螺母 9. 调节丝杠

1.2.1 弹簧安装尺寸和载荷设计

根据机械设计手册^[21],设计弹簧时需知道弹簧初始拉力和弹簧最大工作载荷,确定弹簧参数,然后明确弹簧的安装尺寸。

(1) 弹簧安装尺寸和载荷的确定

由图2 弹簧和深松铲尖的安装位置,可以得到弹簧力与耕作阻力的关系为

$$F_0 = \frac{522R_0}{256} \quad (1)$$

式中 F_0 ——弹簧安装载荷,N

R_0 ——土壤阻力,N

选取河北省固安县土壤数据为设计背景,其土壤为带状壤土,根据张嘉昆^[22]的研究,初选土壤阻力为3 000 N,最大阻力为5 000 N。根据式(1)可得弹簧初始拉力 $F_0 = 6\ 118$ N,最大工作载荷为 $F_{\max} = 10\ 196$ N。

(2) 弹簧选取

根据 GB 1222 和 GB/T 1239.6—1992,选定弹簧材料为热轧弹簧钢 65Mn,其抗拉强度和许用切应力分别为: $\sigma_b = 980$ MPa, $[\tau] = 380$ MPa,切变模量 $G = 7.9 \times 10^4$ MPa。根据机械设计手册进行弹簧参数的确定:

(1) 预选旋绕比:根据 GB/T 1239.6—1992,一般取 $C = \frac{D}{d} \approx 4 \sim 8$,曲度系数 K 为

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (2)$$

式中 K ——圆截面弹簧丝曲度系数

C ——弹簧旋绕比,也称为弹簧指数

预选旋绕比为4.1,根据式(2)得到弹簧曲度系数 K 为1.39。

(2) 试算弹簧丝直径

$$d = 1.6 \sqrt{\frac{KCF_{\max}}{[\tau]}} \quad (3)$$

式中 d ——弹簧丝直径,mm

根据式(3)计算得到,弹簧丝直径 $d = 20$ mm。

(3) 确定弹簧刚度

$$k = \frac{F_{\max} - F_0}{\lambda_{\max}} \quad (4)$$

式中 k ——弹簧刚度,N/mm

$\lambda_{\max}$ ——弹簧工作最大拉伸位移,mm

根据式(4)计算得,弹簧刚度 $k = 81.56$ N/mm。

(4) 计算弹簧有效圈数

$$n = \frac{Gd}{8C^3k} \quad (5)$$

式中 n ——弹簧有效圈数

根据式(5)计算得到,弹簧有效圈数 $n = 35$ 。

(5) 根据以上结果,求出弹簧外径、内径和自由长度等参数,不符合安装要求,重新选择旋绕比,重新进行计算。弹簧各参数计算式为

$$D = Cd \quad (6)$$

$$D_1 = D - d \quad (7)$$

$$D_2 = D + d \quad (8)$$

$$X_0 = \frac{F_0}{k} \quad (9)$$

$$H_0 = (n+1)d + 2D_1 \quad (10)$$

$$H = H_0 + X_0 \quad (11)$$

$$\vartheta = \arctan \frac{p}{\pi D} \quad (12)$$

$$L = \pi Dn + 2\pi D \quad (13)$$

式中 D ——弹簧中径,mm p ——节距,mm

D_1 ——弹簧内径,mm

D_2 ——弹簧外径,mm

X_0 ——弹簧初始位移,mm

H_0 ——弹簧自由高度,mm

H ——弹簧安装高度,mm

ϑ ——弹簧螺旋角,(°)

L ——弹簧材料展开长度,mm

根据式(6)~(11)计算得,弹簧中径 $D = 82$ mm,弹簧外径 $D_2 = 102$ mm,弹簧内径 $D_1 = 62$ mm,弹簧初试位移 $X_0 = 75$ mm,弹簧自由高度 $H_0 = 844$ mm,弹簧安装高度 $H = 919$ mm,螺旋角 $\vartheta = 4.44^\circ$,弹簧材料展开长度 $L = 9\ 526.76$ mm。

经过以上计算得到的弹簧尺寸符合 GB/T 1358—1993 规定的标准弹簧尺寸系列值,最终确定设计弹簧参数,弹簧有效圈数 $n = 35$,材料直径 $d = 20$ mm,节距 $p = 20$ mm,弹簧中径 $D = 85$ mm,外径 $D_2 = 105$ mm,弹簧内径 $D_1 = 65$ mm,弹簧自由高度 $H_0 = 900$ mm,弹簧刚度 $k = 81.56$ N/mm,弹簧端部形式采用 L III 型圆钩环,旋向为右旋。

(6) 验算疲劳强度

由 $C = D/d = 85/20 = 4.25$,查机械设计手册图 7.1-4 得曲度系数 $K = 1.37$ 。

$$\tau_{\min} = \frac{8KDF_{\min}}{\pi d^3} \quad (14)$$

$$\tau_{\max} = \frac{8KDF_{\max}}{\pi d^3} \quad (15)$$

根据式(14)、(15)可以计算得到工作切应力 $\tau_{\min} = 226$ MPa, $\tau_{\max} = 378$ MPa。

从而得到

$$\gamma = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} = 0.62$$

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_b} = 0.39$$

从机械设计手册图 7.1-5 查 $\gamma = 0.62$ 和 $\tau_{\max}/\sigma_b = 0.39$ 的交点在 10^7 作用次数以下,表明此弹簧的疲劳寿命 $N > 10^7$ (作用次数),弹簧设计满足要求。

1.2.2 预紧力调节装置设计

在深松机工作过程中,通过调节弹簧预紧力,可使深松机适应不用地区的土壤特性,增强深松机的适用性,节省农时。弹簧预紧力调节装置(图 3、4)由调节丝杠、调节螺母、调节板、调节销轴和弹簧罩组成。弹簧罩两侧加工有长孔,调节销轴通过长孔与弹簧罩配合,调节板与弹簧罩焊接,调节板开有圆孔,调节丝杠穿过圆孔通过钩子与调节销轴挂接,调节螺母与调节丝杠通过螺纹配合,其一端与调节板接触。在深松机开始工作时,通过特制手柄转动调节螺母使调节丝杠在水平方向移动,带动调节销轴在弹簧罩的长孔中移动,拉伸弹簧实现弹簧预紧力的调节。调节板上焊接有两根矩形棍,增强了调节板的强度,保证了作业的可靠性,弹簧罩还可以起到保护弹簧的作用,这种调节方式简单方便,能够快速改变弹簧预紧力符合作业需求,提高机具的作业效率。

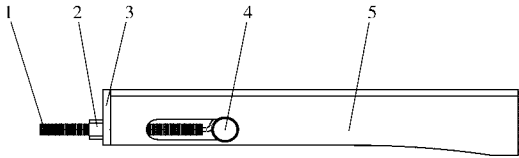


图3 预紧力调节装置装配图

Fig.3 Assembly drawing of pre-tightening force adjusting device

1. 调节丝杠 2. 调节螺母 3. 调节板 4. 调节销轴 5. 弹簧罩

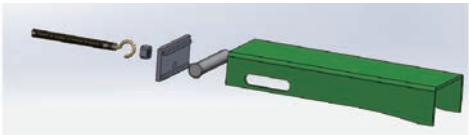


图4 预紧力调节装置三维爆炸图

Fig.4 Three-dimensional explosion figure of pre-tightening force adjusting device

2 材料和方法

2.1 试验材料

2.1.1 试验仪器

HP-20K 型数显式推拉力计;TJSD-750 II 型土壤坚实度仪;环刀 60 个,30 m 皮尺 1 盒,量程 1 m 刚尺 1 个,便携式计算机 1 台,5 m 卷尺 1 盒,牵引钢丝绳 1 条,U 型卡 2 个,环刀手柄 2 个,标杆 8 个;本试验测土壤耕作阻力时采用 2 台拖拉机,拉力传感器安装在 2 台拖拉机中间,其中一台拖拉机为悬挂拖拉机,与深松机连接,不提供动力,拖拉机型号为

东方红 404;另一台拖拉机提供动力,为牵引拖拉机,型号为 M1000-D,后轮驱动。

2.1.2 试验地概况

试验时间:2015 年 10 月 18 日。试验地点:河北省廊坊市固安县西市村农田。试验地基本情况:试验地地势平坦,坡度均小于 5°,土壤类型为带状沙壤土类型,前茬作物为玉米,田间有少量玉米秸秆和杂草,地区年降水量为 500~600 mm。

2.2 试验方法

2.2.1 试验方案

(1)为了探究不同弹簧预紧力与牵引阻力和耕深均匀性之间的关系,设计了预紧力的单因素试验,通过比较 4 个预紧力水平下牵引阻力,说明预紧力可调对机具作业的重要性。试验因素如表 1 所示。

表 1 预紧力试验因素				
Tab.1 Pre-tightening force test factors kN				
因素	水平			
	1	2	3	4
预紧力 F	6.5	8.5	11.4	13.8

(2)为了探究机具作业过程中速度与耕作深度对牵引阻力的影响,在机具振动与非振动的条件下设计了速度与深度的两因素三水平全因素试验,试验因素如表 2 所示。通过对牵引阻力试验结果的显著性分析,确定在振动与非振动的条件下,速度与深度对牵引阻力的影响程度;并且通过比较振动与非振动下的牵引阻力,确定自激式振动深松机的减阻比。

表 2 试验因素与水平		
Tab.2 Test factors and levels		
水平	因素	
	速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	深度 h/mm
1	2.5	250
2	3.2	300
3	4.0	350

2.2.2 试验步骤

(1)地块按试验要求划分小区,每个小区长 30 m,小区两端插好标杆,测量时取中间稳定运行的 15 m 作为测量范围。

(2)调整深松机弹簧预紧力,在深松深度为 350 mm 和拖拉机速度为慢二 的情况下,测定机具的实际耕深和牵引阻力。

(3)在进行试验时牵引拖拉机的挡位分别设置为慢一、慢二和快一,悬挂拖拉机为空挡;深松机具的耕深为 250、300、350 mm,在不同的速度与深度下测定机具的耕作阻力。

(4)测定深松机牵引阻力时,推拉力计的数值

为整个机组工作时的牵引阻力,再测出后挂拖拉机的牵引阻力,两者相减的差值即为深松机具的牵引阻力。

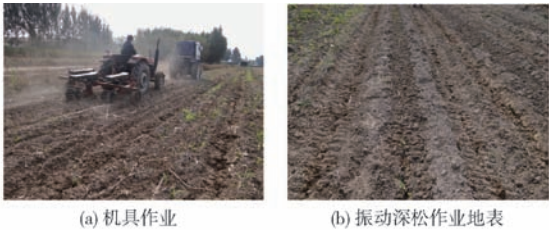


图 5 田间试验
Fig.5 Photos of filed experiment

3 结果与分析

通过速度与深度的两因素三水平的全因素试验,得到的牵引阻力如图 6 所示,拉力计每隔 0.2 s 进行一次阻力的采样,由采样点绘制力的曲线。

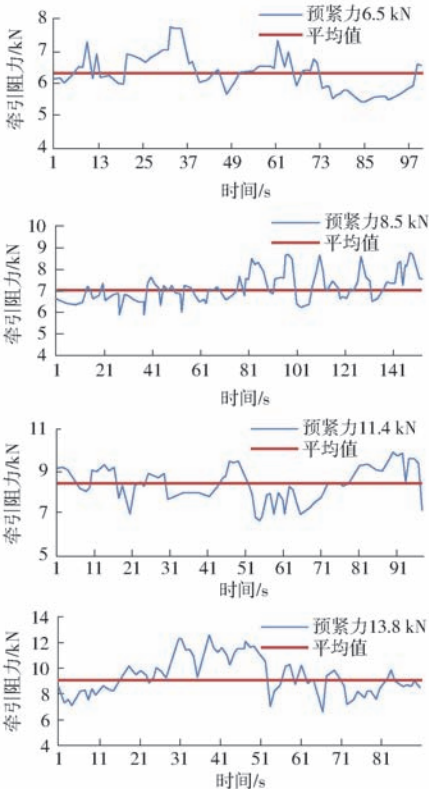


图 6 不同预紧力下牵引力曲线

Fig.6 Traction curves under different pre-tightening forces

不同弹簧预紧力下的牵引阻力和耕深均匀性如表 3 所示。

表 3 不同预紧力时牵引阻力和耕深均匀性

Tab.3 Traction resistance and tillage depth uniformity under different pre-tightening forces

参数	预紧力 F/kN			
	6.5	8.5	11.4	13.8
牵引阻力/ kN	6.33	7.15	8.44	8.91
平均耕深/ mm	29.3	32.2	34.1	35.0

由表 3 可以看出,在一定范围内随着弹簧预紧力的增加,机具作业时受到的牵引阻力显著增大,但是耕作深度越接近初始设定值。

不同速度与深度下的振动、非振动牵引阻力如表 4、5 所示。

表 4 不同速度时的牵引阻力和减阻比

Tab.4 Traction resistance and drag reduction ratio at different velocities

速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	参数	深度 h/mm		
		250	300	350
2.5	振动阻力/ kN	9.23	10.27	11.66
	非振动阻力/ kN	10.59	11.50	14.04
	减阻比/ $\%$	19.26	15.43	22.65
3.2	振动阻力/ kN	11.20	12.22	12.52
	非振动阻力/ kN	12.43	13.38	14.55
	减阻比/ $\%$	11.48	11.69	18.30
4.0	振动阻力/ kN	12.09	12.50	13.06
	非振动阻力/ kN	13.06	13.93	15.63
	减阻比/ $\%$	10.30	13.90	21.43

表 5 空载时牵引阻力

Tab.5 Traction resistance under noload

参数	速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$		
	2.5	3.2	4.0
牵引阻力/ kN	3.46	3.53	3.64

由表 4 可得:

(1)作业速度不变时,随着耕作深度的增加,振动与非振动牵引阻力逐渐增加;在 v_1 、 v_2 、 v_3 3 种速度下,牵引阻力变化较大的是 v_1 ,说明低速作业时,随着耕深的增加,机具对土壤阻力的反馈较为明显。

(2)耕作深度不变时,随着作业速度的增加,振动与非振动牵引阻力逐渐增加。

(3)在 v_1 、 v_2 、 v_3 3 种速度下,随着耕作深度的增加,振动深松牵引阻力增加速率小于非振动深松,说明,在机具作业时,自激振动单元有效地减小了机具耕作时的牵引阻力,减阻比为 10.30% ~ 22.65%。

振动深松和非振动深松牵引阻力的方差分析结果如表 6 所示;因素显著性判断标准为,当 $F_{0.05} < F_x \leq$

表 6 振动深松牵引阻力方差分析

Tab.6 Variation analysis of vibration deep loosening traction resistance

变异来源	SS	自由度	MS	F 值	显著性
截距	2 781.834	1	2 781.834	9 272.923	
速度 v	13.811	2	6.905	23.018	**
深度 h	12.981	2	6.491	21.636	**
机具类型	11.600	1	11.600	38.668	**
误差 e	3.600	12	0.300		
总变异	2 823.826	18			

$F_{0.01}(x=v,h)$ 时, x 即在 5% 水平下显著, 标记为“*”; 当 $F_x > F_{0.01}$ 时, x 即在 1% 水平下显著, 标记为“**”说明该因素的影响非常显著。

由表 6 可知, 深松机作业速度 v 、耕作深度 h 以及机具类型对深松牵引阻力表现出了非常显著的影响, 说明自激振动深松机能有效降低机具牵引阻力。

4 结论

(1) 通过预紧力调节装置可以快速、方便地调节弹簧预紧力, 增强深松机的适用性; 自激振动单元在作业过程中可有效减小机组的耕作阻力, 与非振动深松机相比, 设计的自激振动深松机可以使机具

的耕作阻力降低 10.30% ~ 22.65%。

(2) 在一定范围内, 随着弹簧预紧力的增大, 机具作业时的耕作阻力显著增大, 但耕深稳定性越好。

(3) 机具作业速度不变时, 随着耕作深度的增加, 牵引阻力逐渐增大; 耕作深度不变时, 随着作业速度的增加, 牵引阻力逐渐增大; 振动深松机由于自激振动单元的减阻作用, 牵引阻力的增加速率小于非振动深松机。

(4) 通过对试验数据的方差分析可知: 振动深松作业时, 作业速度对牵引阻力的影响非常显著, 耕作深度对牵引阻力的影响一般显著; 非振动作业时, 作业速度和耕作深度对牵引阻力的影响都非常显著。

参 考 文 献

- 1 杨晓波. 玉米生产机械化深松整地技术及其作用[J]. 农机使用与维修, 2012(5): 5.
- 2 陈浩, 吴伟蔚, 刘新田, 等. 轮胎压实对机具牵引阻力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 41(2): 52–57.
CHEN Hao, WU Weiwei, LIU Xintian, et al. Effect of wheel traffic on working resistance of agricultural machinery in field operation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 41(2): 52–57. (in Chinese)
- 3 BOTTA G F, JORAJURIA D, BALBUENA R, et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 91(1–2): 164–172.
- 4 朱凤武, 王景利, 潘世强, 等. 土壤深松技术研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(4): 457–461.
ZHU Fengwu, WANG Jingli, PAN Shiqiang, et al. Advances in researches of subsoiling technique[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(4): 457–461. (in Chinese)
- 5 朱瑞祥, 张军昌, 薛少平, 等. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 145–147.
ZHU Ruixiang, ZHANG Junchang, XUE Shaoping, et al. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 145–147. (in Chinese)
- 6 张西群, 齐新, 董文旭, 等. 玉米深松免耕播种对土壤性状及玉米生长发育的影响[J]. 河北农业科学, 2010, 14(3): 26–28.
ZHANG Xiqun, QI Xin, DONG Wenxu, et al. Effects of subsoiling and no-till planting on soil physical properties and growth and development of maize[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(3): 26–28. (in Chinese)
- 7 齐华, 刘明, 张卫健, 等. 深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(4): 191–196.
QI Hua, LIU Ming, ZHANG Weijian, et al. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(4): 191–196. (in Chinese)
- 8 王新兵. 深松耕作对土壤理化特征及玉米根系空间分布的调控效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- 9 周桂霞, 汪春, 冷江龙, 等. 机械化深松技术的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2005(3): 44–45.
ZHOU Guixia, WANG Chun, LENG Jianglong, et al. The research current situation of the mechanized deep-loosen technology and development trend[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(3): 44–45. (in Chinese)
- 10 夏伟. 机械深松整地技术应用与发展[J]. 农业工程, 2013, 3(3): 36–39.
XIA Wei. Application and development on soil preparation technology of mechanical deep scarification[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(3): 36–39. (in Chinese)
- 11 曹奎贤, 陶延怀, 安清平. 振动深松技术对作物产量的影响[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(5): 13–14.
CAO Kuixian, TAO Yanhuai, AN Qingping. Impact of vibration subsoiling technology on the crop yield[J]. Water Science and Technology in Heilongjiang Province, 2007, 35(5): 13–14. (in Chinese)
- 12 李汝莘, 高焕文, 苏元升. 土壤容重和含水率对耕作阻力的影响[J]. 农业工程学报, 1998, 14(3): 81–85.
LI Ruxin, GAO Huanwen, SU Yuansheng. Effect of soil bulk density and moisture content on the draft resistance[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(3): 81–85. (in Chinese)
- 13 郭志军, 佟金, 周志立, 等. 深松技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 169–174.
GUO Zhijun, TONG Jin, ZHOU Zhili, et al. Review of subsoiling techniques and their applications[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 169–174. (in Chinese)
- 14 郭文斌. 我国深松机具的现状与发展方向探讨[J]. 中国农机化, 1996(5): 39–41.
GUO Wenbin. Investigate the current situation and developmental direction of Chinese deep loosening machinery[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 1996(5): 39–41. (in Chinese)
- 15 李霞. 振动深松减阻机理及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.

- 16 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.
- 17 POJE T. Changes in soil physical status in an orchard following passage of a vibrating subsoiler[J]. SAD, Revija Za Sadjarstvo, Vinogradnistvo in Vinarstvo, 2005, 16(2): 26 – 27.
- 18 NAGASAKI Y, OKAZAKI K, MIYAZAKI M. Development of working system for subsurface tillage. Part 1. Working characteristics of vibrating subsoiler[J]. Bulletin of the Shikoku National Agricultural Experiment Station, 1996, 60: 89 – 104.
- 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 – 75.
QIU Lichun, LI Baofa. Experimental study on self-excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 72 – 75. (in Chinese)
- 20 王雪艳. 振动深松技术与关键部件研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
WANG Xueyan. Study on vibrating subsoiling technology and its key parts[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 21 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.
- 22 张嘉昆. 深松(中耕)追肥多功能作业机具关键部件研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHANG Jiakun. Research on the key components of the subsoiling (intertill) topdressing multifunction machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 23 袁志发, 周静芊. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- ~~~~~

(上接第 95 页)

- 12 陈学庚, 康建明. 水稻膜下滴灌种植与播种机的研究开发[J]. 农机化研究, 2013(3): 2627 – 2631.
CHEN Xuegeng, KANG Jianming. Rice drip irrigation under plastic film cultivation and research development of planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(3): 2627 – 2631. (in Chinese)
- 13 卢勇涛, 陈学庚, 李亚雄. 鸭嘴滚筒式气吸精量穴播器的设计与试验[J]. 中国农机化, 2012(1): 104 – 106.
LU Yongtao, CHEN Xuegeng, LI Yaxiong. Design and experiment on air-suction cotton precision dibbler with duckbilled roller [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(1): 104 – 106. (in Chinese)
- 14 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and rolling with precision seeder [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 15 张东海. 螺旋输送机的优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
ZHANG Donghai. The optimization research of screw conveyer [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 16 马旭, 邝健霞, 齐龙, 等. 水稻田间育秧精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 32 – 37.
MA Xu, KUANG Jianxia, QI Long, et al. Design and experiment of precision seeder for rice paddy field seeding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 32 – 27. (in Chinese)
- 17 GB/T6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.
GB/T6973—2005 Testing method of single seed drills (precision drills) [S]. 2005. (in Chinese)
- 18 NY/T1559—2007 滴灌铺管铺膜精密播种机质量评价技术规范[S]. 2007.
NY/T1559—2007 Technical specification for quality evaluation of pipelaying and film-covering precision drill [S]. 2007. (in Chinese)
- 19 陈林, 程莲, 李丽, 等. 水稻膜下滴灌技术的增产效果与经济效益分析[J]. 中国稻米, 2013, 19(1): 41 – 43.