

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.005

# 仿形弹性镇压辊设计与试验\*

贾洪雷<sup>1,2</sup> 王文君<sup>1,2</sup> 庄健<sup>1,2</sup> 罗晓峰<sup>1,2</sup> 姚鹏飞<sup>1,2</sup> 李杨<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 针对保护性耕作条件下与大豆耕播机配套的镇压辊压实土壤不均匀、相关耕播机具纵向尺寸过长的问题, 设计了一种仿形弹性镇压辊, 采用弹性辐条结构, 通过理论分析确定了镇压辊的主要结构参数: 直径  $D = 450$  mm, 宽度  $B = 210$  mm, 弹性辐条数量  $n = 12$ 。利用 ADAMS 软件对镇压辊进行运动仿真, 同时进行土槽试验, 采用  $L_9(3^4)$  正交试验, 在土壤干基含水率为 20% 时, 考察了仿形弹性镇压辊的弹簧刚度  $k$ 、载荷  $F$ 、作业速度  $v$  和土壤坚实度  $P$  对其镇压力波动的影响。通过 ADAMS 运动仿真, 找到了各因素的最佳取值范围; 通过正交试验, 得到了各因素的主次顺序: 载荷、弹簧刚度、土壤坚实度、作业速度, 最优组合为载荷 800 N, 弹簧刚度 5 N/mm, 土壤坚实度 15 kPa, 作业速度 0.5 m/s, 模拟仿真的结果与试验结果吻合很好。通过对比试验, 得到仿形弹性镇压辊在垄台表面有一定倾角的情况下能更好地保证镇压的均匀性。

**关键词:** 仿形弹性镇压辊 设计 仿真 试验

**中图分类号:** S222.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0028-08

## Design and Experiment of Profiling Elastic Press Roller

Jia Honglei<sup>1,2</sup> Wang Wenjun<sup>1,2</sup> Zhuang Jian<sup>1,2</sup> Luo Xiaofeng<sup>1,2</sup> Yao Pengfei<sup>1,2</sup> Li Yang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Considering the deficiencies in uneven soil compaction and the too long vertical size that exists in the soybean tillage sowing machine during conservation tillage, the profiling elastic press roller which adopts the elastic spoke structure was designed. The main structure parameters of the press roller were determined through theoretical analysis, which means diameter  $D$  of 450 mm, breadth  $B$  of 210 mm and number of spokes  $n$  of 12. The work process of the roller was simulated by using the ADAMS software, at the same time, orthogonal tests of  $L_9(3^4)$  were performed in an indoor soil bin with moisture content (dry basis) of 20%. The effects of spring stiffness coefficient ( $k$ ), total loads ( $F$ ), operation speed ( $v$ ) and soil compactness ( $P$ ) on pressure fluctuation were determined. The optimum ranges of each factor were determined through the ADAMS motion simulation. The results of orthogonal tests showed the primacy sequence of the experiment factors were total loads, spring stiffness coefficient, soil compactness, the operation speed, and optimal levels of the experiment factors were  $F$  of 800 N,  $k$  of 5 N/mm,  $P$  of 15 kPa and  $v$  of 0.5 m/s. The simulation results are in good agreement with the experimental results in the pressure fluctuations. Under the condition of a certain inclination angle on the ridge surface, the profiling elastic press roller can better ensure uniformity of soil compaction than that of conventional roller.

**Key words:** Profiling press roller Design Simulation Experiments

收稿日期: 2014-09-29 修回日期: 2014-10-25

\* 国家自然科学基金资助项目(51305158)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B03)和吉林省科技发展计划资助项目(20125027)

作者简介: 贾洪雷, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术及仿生智能作业机械研究, E-mail: jiahl@vip.163.com

通讯作者: 庄健, 博士后, 主要从事农业机械部件耦合仿生设计研究, E-mail: zhuangjian\_2001@163.com

## 引言

镇压是耕播作业过程中的关键环节,其作用主要是保墒并减少风蚀<sup>[1-2]</sup>,镇压作业的质量直接关系到整个耕播作业的质量,而镇压装置的优劣程度决定了镇压作业的质量,因此对镇压装置的研究是十分必要的。国内外对耕播机镇压装置方面的研究较少<sup>[3]</sup>,研究主要集中在播种机的镇压辊,且使用较多的是圆柱镇压辊和V型镇压辊。在镇压辊的研究方面,罗红旗等进行了免耕播种机组合镇压器设计研究<sup>[4]</sup>,王景立等进行了精密播种机可变量苗带镇压器的试验研究<sup>[5]</sup>,刘伟光等对多功能碎土镇压辊进行设计和研究<sup>[6]</sup>,这些镇压辊仿形机构均采用铰接或悬臂结构,纵向尺寸过长。谢宇峰等进行了高速气吸式精密播种机的研制<sup>[7]</sup>,其镇压辊辊架采用高度调节装置,能有效减小纵向尺寸,但作业过程中不能实时仿形。国外对镇压装置的研究相对深入些,在结构形式、制造工艺和实际作业效果方面都优于国内,例如镇压辊可以随地表仿形进行镇压作业,并可根据配套动力确定作业幅宽与组数等<sup>[8]</sup>,但由于仿形机构均作用在辊架上,也存在纵向尺寸过长的问题。以上镇压辊均没有横向仿形功能,横向镇压不均匀。

现有的大豆耕播机的镇压辊,大都采用悬臂与机架刚性连接的方式,其仿形机构位于悬臂上,这种镇压辊的镇压力可以达到30~50 kPa,且具有较强的纵向仿形能力<sup>[9]</sup>。在东北地区,大豆一般采用垄上两行或多行种植技术,传统镇压辊不能横向仿形,当垄台表面有倾角时,横向镇压不均匀,影响大豆出苗的一致性;同时传统镇压辊安装后会使得机具的纵向尺寸增加500~800 mm,不利于机具的运输及地头转弯,且悬臂过长,作业过程中易变形,造成镇压力不够。

作业过程中,若镇压辊在保证足够镇压力的同时,既拥有良好的横向、纵向仿形能力,又能有效减小机具纵向尺寸,那么机具的整体性能和作业质量也会得到提升。为此,本文设计一种仿形弹性镇压辊,将传统镇压辊辊架上的仿形机构转移到镇压辊内部,在保证镇压辊足够镇压力的同时,解决耕播机具镇压不均匀和纵向尺寸过长的问题。同时通过ADAMS运动仿真和土槽试验,研究弹簧刚度、载荷、作业速度和土壤坚实度4个因素对镇压力波动的影响,并寻找各因素的最优组合。

## 1 仿形弹性镇压辊设计

仿形弹性镇压辊结构如图1所示。在作业过程

中,仿形弹性镇压辊可通过弹性辐条的伸缩变形实现随地仿形。

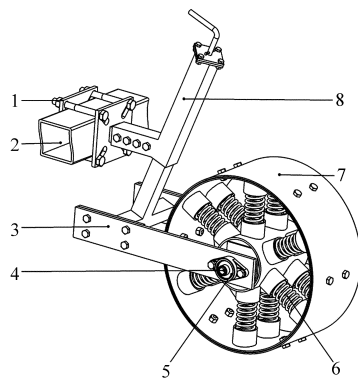


图1 仿形弹性镇压辊结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of profiling elastic press roller  
1. 夹持板 2. 机架 3. 辊架 4. 中心轴 5. 球面轴承 6. 弹性辐条 7. 辊筒 8. 高度调节装置

镇压辊的辊架通过夹持板与耕播机具刚性连接,镇压辊辊筒和中心轴采用弹性辐条连接,安装时每根弹性辐条都有一定预紧力。镇压辊闲置时,各弹性辐条压缩长度相同,中心轴与辊筒轴线重合,未发生偏心。镇压辊正常作业时,与地面接触产生的反作用力使中心轴偏离辊筒轴线产生偏心。

实现纵向仿形:作业过程中,当镇压辊遇到凸起地面时,镇压辊面与地面接触压力增大,弹性辐条受到压缩而缩短,镇压辊辊筒相对镇压辊中心轴上移;当镇压辊遇到低洼地面时,镇压辊面与地面接触压力减小,弹性辐条压缩量减小,镇压辊辊筒相对镇压辊中心轴下移。

实现横向仿形:作业过程中,若垄台截面有一定倾角,当镇压辊经过此垄台时,镇压辊一侧的弹性辐条受到压缩而缩短,另一侧弹性辐条受力较小相对伸长。

镇压辊的结构参数会对镇压辊的作业质量产生显著影响<sup>[10]</sup>,因此需要合理设计选择其结构参数和作业参数。仿形弹性镇压辊的设计,需要确定镇压辊宽度、直径、载荷、辐条数量等主要结构参数和作业参数。

### 1.1 镇压辊宽度

镇压辊宽度是由开沟宽度和播种行距(或垄距)决定的。对耕播机来说,镇压辊宽度小于种沟宽度,就容易造成苗带下沉,在地表形成沟状;而镇压辊的宽度过大,相同负载条件下,压强减小,会造成较差的镇压和碎土效果,不能达到农艺要求的镇压力<sup>[11]</sup>。本文所设计的仿形弹性镇压辊用在垄上双行大豆耕播机上,此耕播机所采用的开沟器是滑刀式开沟器<sup>[12]</sup>,因此,仿形弹性镇压辊宽度应与滑刀式开沟器的开沟宽度相匹配。滑刀式开沟器的开

沟宽度可根据以下方法进行计算确定。

滑刀式开沟器开出的沟形示意图如图2所示。沟形上各点坐标分别为 $A(x_a, y_a)$ 、 $B(x_b, y_b)$ 、 $C(x_c, y_c)$ 、 $D(x_d, y_d)$ 、 $E(x_e, y_e)$ 、 $F(x_f, y_f)$ 、 $G(x_g, y_g)$ 、 $H(x_h, y_h)$ 。A点横坐标最小, B点横坐标最大, D点纵坐标最大, C、E两点是以 $x = x_d$ 为分界线的左、右两侧纵坐标最小点( $y_c \leq y_e$ )。则

幅宽

$$d_1 = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (1)$$

垄宽

$$d_2 = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (2)$$

沟深

$$h_2 = \frac{x_a y_d - x_a y_b + x_b y_a - x_b y_d + x_d y_b - x_d y_a}{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}} \quad (3)$$

回土深度

$$h_3 = y_d - y_h \quad (4)$$

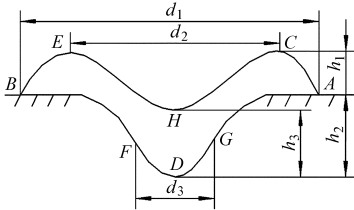


图2 沟形参数和特征点示意图

Fig. 2 Ditch shape parameters and feature points

把1/2沟深处测量的宽度定义为沟宽,图2中F、G两点处有

$$y_f = y_g = y_d - \frac{h_2}{2} \quad (5)$$

按此条件可找到F、G两点。若多于两点,则x值最小点为F点,x值最大的为G点。

沟宽

$$d_3 = \sqrt{(x_g - x_f)^2 + (y_g - y_f)^2} \quad (6)$$

根据东北黑土地地区大豆种植的农艺要求,标准型滑刀式开沟器的开沟宽度为5~8 cm,开沟深度为7~15 cm<sup>[13]</sup>。镇压辊的宽度应大于开沟宽度 $d_3$ ,同时小于播种行距(或垄距),在此基础上可根据经验确定具体值。东北地区大豆垄上双行种植技术是在60~65 cm的垄上种植2行大豆,间距定位10~15 cm,仿形弹性镇压辊要实现垄上双行镇压,其宽度应大于定位间距小于垄距,参照以往镇压辊尺寸,选择仿形弹性镇压辊的宽度 $B = 210$  mm。

## 1.2 镇压辊直径

在保证一定单位面积压强和一定速度的条件下,镇压辊直径与压实效果有很大相关性。轮径越小,镇压的时间越短,对土壤的压实效果就越不理想,同时滑移系数增大,易产生拖土壅土现象<sup>[14]</sup>。

根据阻力的大小与镇压辊直径成反比的原理,应适当加大镇压辊直径以减小作业过程中的滚动阻力。

为找到合理的直径,需要对仿形弹性镇压辊的作业过程进行受力分析,其受力分析示意图如图3所示。

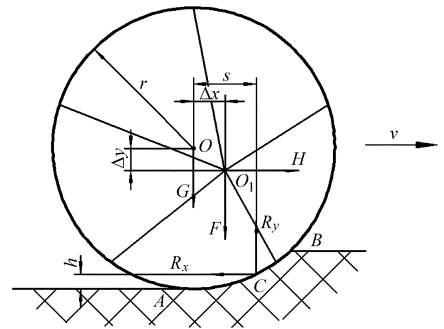


图3 仿形弹性镇压辊的受力示意图

Fig. 3 Force diagram of profiling elastic press roller

力矩分析得

$$H(r - \Delta y) - F\Delta x + R_x h + R_y s = 0 \quad (7)$$

$$Gs - F(s - \Delta x) - H(r - \Delta y) = 0 \quad (8)$$

将式(7)和式(8)联立整理得

$$H(r - \Delta y) = F\Delta x - R_x h - R_y s = Gs - F(s - \Delta x) \quad (9)$$

式中  $H$ ——牵引力  $G$ ——镇压辊筒重力  
 $r$ ——镇压辊半径  $F$ ——载荷  
 $h$ ——C点到最低点的下陷深度  
 $s$ ——镇压辊下陷 $h$ 时,轮子前进长度  
 $R_x$ ——水平方向地面反作用力  
 $R_y$ ——竖直方向地面反作用力  
 $v$ ——镇压辊的前进速度  
 $\Delta x$ ——中心轴偏离辊筒中心的水平距离  
 $\Delta y$ ——中心轴偏离辊筒中心的竖直距离

通过式(9)可以看出,当牵引力和载荷一定时,在相应的速度下,不考虑弹簧的振动,中心轴的偏心距离是不变的,即 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 是不变的。在这种条件下,轮径越小,轮子前进长度 $s$ 越小,镇压时间 $t = s/v$ 越短,镇压效果越不理想,同时也会造成轮子与土壤的滑移系数增大,易产生拖土壅土现象。

因此,镇压辊直径不宜过小。镇压辊直径一般取200~500 mm为宜<sup>[9]</sup>,而仿形弹性镇压辊内部的弹性辐条需要足够的安装空间,还要保证较大的仿形行程,综合考虑分析,仿形弹性镇压辊直径选择 $D = 450$  mm。

## 1.3 镇压辊载荷

非刚性路面承受载荷,当轮子的下陷量不大时,下陷量的计算可简化为<sup>[15]</sup>

$$Z_0 = \frac{6Q}{5KBD^{1/2}} \quad (10)$$

其中  $K = \alpha_0 (1 + 0.27B)$  (11)

式中  $Z_0$ ——下陷量, cm

$Q$ ——作用在镇压辊上的总载荷, N

$K$ ——土壤特性系数

$\alpha_0$ ——与土壤性质有关的参数

对刚松过土的粘土土壤来说,土壤特性相关参数取  $\alpha_0 = 1.01$ 。镇压辊的下陷量取  $Z_0 = 8$  mm, 镇压辊的宽度为  $B = 210$  mm, 直径为  $D = 450$  mm, 代入式(10)和式(11)经计算得到作用在镇压辊上的总载荷  $Q = 632.6$  N。

镇压辊的接地情况如图4所示,由图4得镇压辊的接地面积

$$S = Bl_{AB} = B\beta D/2 \quad (12)$$

其中  $\cos\beta = \frac{D - 2Z_0}{D}$

式中  $\beta$ ——接触角

$l_{AB}$ ——镇压辊与地面接触弧长, cm

经计算得到接地面积  $S = 126.4$  cm<sup>2</sup>。

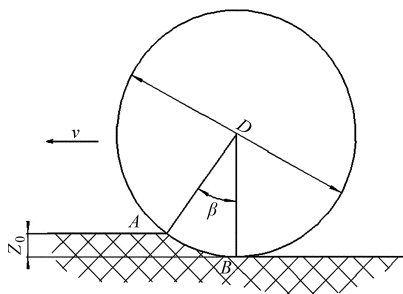


图4 镇压辊的接地情况

Fig. 4 Contact between press roller and ground

镇压辊辊筒工作时变形较小,可以近似看作不发生弹性变形的刚体,忽略镇压辊下土壤向两侧流动,则接地面上边缘和中心部位的土壤被同等程度地压紧。这样,镇压轮对地面的垂直作用力可以近似认为是在矩形面上的均匀分布。镇压轮接地压强为  $\rho$ , 则

$$\rho = \frac{Q}{S} = 50.0 \text{ kPa} \quad (13)$$

镇压辊对土壤的压强主要根据土壤的性质、水分、密度和作物的要求而定,一般为 30 ~ 50 kPa<sup>[9]</sup>。根据东北地区土壤条件,大豆种植的镇压辊的接地压强大于玉米等作物。通过理论计算得到接地压强  $\rho = 50.0$  kPa,符合东北地区大豆种植的农艺要求。

#### 1.4 镇压辊弹性辐条数量

仿形弹性镇压辊的载荷作用在弹性辐条上,弹性辐条沿半径方向安装,考虑到弹性辐条数量太多造成镇压辊结构复杂、尺寸过大、成本过高等,太少则影响镇压辊的工作稳定性和弹性辐条的寿命,经过初步分析弹性辐条的数量选择 12 根。为了简化

计算,将弹性辐条等效为竖直方向的 5 ~ 7 根弹性辐条。这样每根弹簧上所加的载荷  $q = Q/n = 90.4 \sim 126.5$  N,其中  $n$  为弹性辐条数量,根据胡克定律<sup>[16]</sup>

$$F = k\Delta l \quad (14)$$

式中  $k$ ——弹簧刚度  $\Delta l$ ——弹簧变形量

镇压辊的仿形行程  $\Delta l = 30$  mm, 弹簧拉力为  $F = q = 90.4 \sim 126.5$  N, 经计算得到弹簧的刚度  $k = 3.01 \sim 4.22$  N/mm。

其弹簧刚度比较合理。同时,根据其工作状态,选取 Y I 型冷卷压缩弹簧。

## 2 运动仿真

### 2.1 仿真模型的创建

通过 ANSYS 软件建立土体三维有限元模型,如图5所示。土壤相关参数为:土壤密度为 1 255 kg/m<sup>3</sup>;弹性模量为 1.18 MPa;土壤的泊松比选 0.45;塑性参数中的偏心率选 0.1;摩擦角为 15.7°;膨胀角取 0°;内聚力取 10 000 Pa;热膨胀系数取 0<sup>[17-18]</sup>。建立长 5 m、宽 0.5 m、高 0.1 m 的立方体,采用四面体网格划分单元,得到 37 232 个单元 (Elements)、59 074 个节点 (Nodes),生成土体三维有限元模型的 MNF 文件。

在 ADAMS 软件中导入土体三维有限元模型的 MNF 文件,然后建立仿形弹性镇压辊的虚拟样机。在镇压辊虚拟样机模型中,辊架以及弹性辐条两端短杆是通过连杆图库建立的,镇压辊辊筒是通过拉伸体图库建立的,中心轴是通过圆柱图库建立的。

几何建模后,要对所建的几何模型添加约束条件。支架与中心轴采用铰链运动副约束。弹性辐条简化为弹簧阻尼器,两端通过短杆分别与中心轴和辊筒连接,并使用平移副约束。弹性辐条与中心轴、辊筒均采用铰链运动副连接。镇压辊辊筒与地面之间的接触采用面面副约束,实现镇压辊辊筒表面紧贴地面运动。支架末端上添加平移副,并添加平动驱动,为镇压辊提供前进动力,设置沿 X 方向的速度,即机具的作业速度。仿形弹性镇压辊的仿真模型如图6所示。

### 2.2 仿形弹性镇压辊的仿真分析

通过 ADAMS 运动仿真,研究弹簧刚度、载荷、作业速度和土壤坚实度对其镇压力的影响<sup>[19]</sup>,并通过控制变量法找出各因素的最佳取值。

为研究弹簧刚度、载荷、作业速度和土壤坚实度 4 个因素对其镇压力的影响,各因素分别取 3 个水平进行模拟仿真。通过在模型中修改相应的参数改变各因素的水平进行运动仿真。模拟仿真采用控



图5 土体三维有限元模型

Fig. 5 Three-dimensional finite element model of soil



图6 仿形弹性镇压辊的仿真模型

Fig. 6 Simulation model of profiling elastic press roller

制变量法,即:探讨一个因素对镇压力的影响时,另外两个因素固定,统一取3个水平中的中间值。仿真结果如表1所示,表中波动量 $F_f$ 是指镇压力

的实际变化曲线与过滤后的镇压力曲线之间各点的标准差;波动率 $T$ 是指波动量 $F_f$ 与镇压力平均值 $F_a$ 的百分比,即 $T = F_a / F_f \times 100\%$ 。

表1 各因素影响镇压力的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of various factors influence on pressure

镇压力	弹簧刚度 $k/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$			载荷 $F/\text{N}$			速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$			土壤坚实度 $P/\text{kPa}$		
	3	5	7	600	700	800	0.5	1.0	1.5	5	10	15
平均值 $F_a/\text{N}$	714.3	693.5	709.8	640.1	691.8	820.3	715.4	727.6	701.0	695.4	748.6	732.0
波动量 $F_f/\text{N}$	153.2	126.7	128.1	145.7	124.3	109.9	126.7	133.7	135.3	147.4	133.2	118.9
波动率 $T/\%$	21.4	18.3	18.0	22.8	18.0	13.4	17.7	18.4	19.3	21.2	17.8	16.2

由表1可知,随着弹簧刚度的增大,仿形弹性镇压辊对地面产生的镇压力平均值基本不变,而镇压力波动率总体呈递减的趋势。刚度 $k = 3 \text{ N/mm}$ 时,镇压力波动率较大,而刚度 $k = 5 \text{ N/mm}$ 和 $k = 7 \text{ N/mm}$ 时,镇压力波动率较小且近似相等。

随着载荷的增大,仿形弹性镇压辊产生的镇压力平均值也增大,而镇压力波动率呈总体减小的趋势,载荷 $F = 800 \text{ N}$ 时镇压力波动率最小。

随着机具作业速度的增加,仿形弹性镇压辊产生的镇压力平均值基本不变,而镇压力波动率呈递增趋势,但变化较小。

随着土壤坚实度的增加,仿形弹性镇压辊产生的镇压力平均值基本不变,而镇压力的波动率呈总体减小的趋势。土壤坚实度 $P = 15 \text{ kPa}$ 时镇压力波动率最小。

以上仿真结果表明,弹簧刚度、载荷、作业速度和土壤坚实度对镇压力的波动均有较显著影响,并通过控制变量法,找到各影响因子的最佳取值范围:刚度 $k = 5 \sim 7 \text{ N/mm}$ ,载荷 $F = 800 \text{ N}$ ,作业速度 $v = 0.5 \text{ m/s}$ ,土壤坚实度 $P = 15 \text{ kPa}$ 。

### 3 土槽试验

#### 3.1 试验设备和试验方法

试验在吉林大学工程仿生教育部重点实验室的室内土槽进行,土槽长40 m、宽2.8 m、深1.8 m,土槽所用土壤为典型东北地区黄粘土。试验前,0~100 mm处土壤容重密度 $1.05 \text{ g/cm}^3$ ,100~200 mm处土壤容重密度 $1.20 \text{ g/cm}^3$ 。人工调整土壤干基含水率为20%。镇压辊通过自制的辊架与土槽台车相连,在辊架的一侧安装有KTR-50 mm微型自复位电子尺,滚轮端紧贴镇压辊滚筒内侧,且有1/2的预压缩量,目的是将中心轴的位移转换成电信号,用中心轴的位移量来表示镇压辊对土壤的镇压力。KTR-50 mm微型自复位电子尺,与型号为YW-50W 5V10A(铝盒)开关电源相连组成闭合回路,由DH5923型动静态应变仪采集信号,并通过1394接口与计算机相连,将采集的信号传输到计算机。试验设备及作业效果如图7所示。

每组试验重复3次取平均值作为结果。为保证试验的可重复性,每次试验后对土槽内土壤进行人

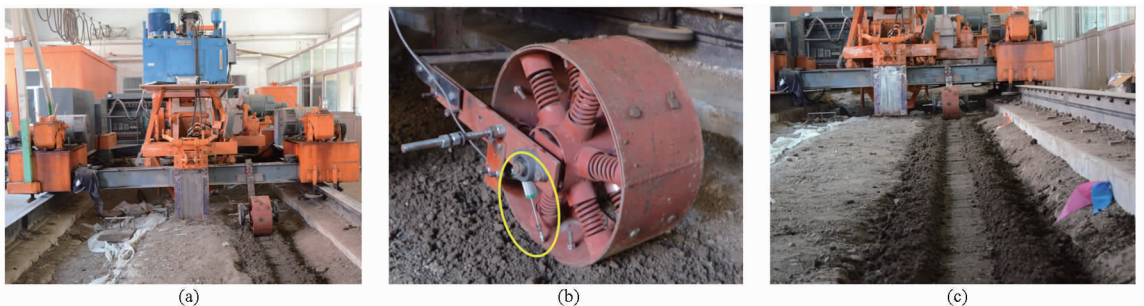


图7 试验设备及作业效果

Fig. 7 Test equipment and operation effect

(a) 土槽台车测试系统 (b) KTR-50 mm 微型自复位电子尺 (c) 仿形弹性镇压辊作业效果

工翻整处理,并将土壤刮平,再用SC-900型土壤坚实度仪测试,达到试验要求的土壤坚实度,同时保证每次试验前的土壤硬度误差在 $\pm 10\%$ 范围内。在作业前进方向上,选取中间20 m的距离每隔5 m设一取样点,共5个取样点,测出作业后每个点的土壤坚实度和土壤容积密度。

### 3.2 试验方案

通过正交试验的方法,找到仿形弹性镇压辊的最佳参数,并探讨各因素对镇压力波动的影响,同时证明仿形弹性镇压辊对土壤的压实更加均匀。

试验选择了影响镇压力波动率的4个因素:弹簧刚度 $k$ ,镇压辊载荷 $F$ ,作业速度 $v$ 和土壤坚实度 $P$ 。每个试验因素各取3个水平,选用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验<sup>[20]</sup>,测试指标为镇压力波动率。正交试验因素水平表如表2所示。因素编码值符号分别为 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 。

表2 正交试验因素水平表

Tab.2 Factor-level table of orthogonal test

水平	因素			
	弹簧刚度/ ( $N \cdot mm^{-1}$ )	载荷/ N	作业速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	土壤坚实度/ kPa
1	3	600	0.5	5
2	5	700	1.0	10
3	7	800	1.5	15

为了对比仿形弹性镇压辊和传统镇压辊的压实效果,起垄时垄台上表面有某一角度(本试验取 $8^\circ$ )的倾斜度,如图8所示,通过测量土壤横向的坚实度差值 $\Delta P_{AB}$ ,即A点的土壤坚实度值与B点土壤坚实度值的差的绝对值,来反映压实的均匀性情况,AB的直线距离为15 cm。同时采用环刀法测定每个轮子压后的土壤容积密度,以评价压实效果。

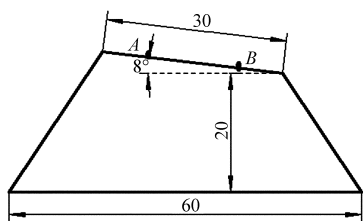


图8 垄台横截面示意图

Fig.8 Cross section diagram of ridge

### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 镇压力波动情况

试验方案和试验结果的极差分析如表3所示。波动率反映了镇压辊作业过程中镇压力的变化情况,波动率越小,镇压越均匀,镇压辊的作业质量越好,反之,镇压辊作业质量越差。

表3中,应用极差分析法得出,在土壤干基含水

表3 试验方案和试验结果极差分析

Tab.3 Test scheme and range analysis of results

试验 序号	因素水平				镇压力波动率 $T/\%$		
	A	B	C	D	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$
1	1	1	1	1	19.25	18.78	20.45
2	1	2	2	2	20.29	17.95	19.26
3	1	3	3	3	16.94	15.55	15.27
4	2	1	2	3	17.61	17.35	15.01
5	2	2	3	1	14.99	16.94	19.42
6	2	3	1	2	13.49	15.12	12.67
7	3	1	3	2	18.72	16.96	16.57
8	3	2	1	3	16.58	13.94	14.88
9	3	3	2	1	14.05	15.35	18.08
$T_{j1}$	163.74	160.70	145.16	157.31			
$T_{j2}$	142.60	154.25	154.95	151.03			
$T_{j3}$	145.13	136.52	151.36	143.13			
$\bar{T}_{j1}$	54.58	53.57	48.39	52.44			
$\bar{T}_{j2}$	47.53	51.42	51.65	50.34			
$\bar{T}_{j3}$	48.38	45.51	50.45	47.71			
$R_{kj}$	7.05	8.06	3.26	4.73			

率为20%时,影响仿形弹性镇压辊的镇压力波动率的主次因素为: $B$ 、 $A$ 、 $D$ 、 $C$ ,各因素的最优水平分别为: $A_2$ 、 $B_3$ 、 $C_1$ 、 $D_3$ 。最优组合为: $B_3A_2D_3C_1$ 。

试验结果方差分析如表4所示。由于本试验设计无空列,且进行了重复试验,所以用统计量为 $\frac{S_j/f_j}{S_{e2}/f_{e2}}$ 、临界值为 $F_\alpha(f_j, f_{e2})$ 的方法进行检验<sup>[20]</sup>。查 $F$ 分布表得, $F_{0.25}(2, 18) = 1.50$ ,  $F_{0.1}(2, 18) = 2.62$ ,  $F_{0.05}(2, 18) = 3.55$ ,  $F_{0.01}(2, 18) = 6.01$ 。

表4 正交试验结果方差分析

Tab.4 Variance analysis of orthogonal test results

方差来源	偏差平方 $S_j$	自由度 $f_j$	均方和	$F$	显著性水平
A	29.62	2	14.81	7.09	0.01
B	34.84	2	17.42	8.33	0.01
C	6.45	2	3.23	1.54	0.25
D	11.22	2	5.61	2.68	0.10
误差	37.57	18	2.09	-	-
总和	119.70	26	-	-	-

对镇压力波动率结果进行方差分析,得到:土壤干基含水率为20%时, $F_A > F_{0.01}(2, 18)$ ,  $F_B > F_{0.01}(2, 18)$ ,  $F_C > F_{0.25}(2, 18)$ ,  $F_D > F_{0.1}(2, 18)$ ,通常把 $\alpha \leq 0.1$ 的因素称为显著因素,故 $A$ 、 $B$ 、 $D$ 因素为显著因素, $C$ 因素为非显著因素。

通过仿真结果与试验结果的对比可以看出,在镇压力的波动率上,仿真模拟结果与试验结果很好地吻合,证明了仿形弹性镇压辊的结构设计和理论分析是合理的。

### 3.3.2 土壤压实均匀性对比

由表5的数据可以看出,在试验范围内,仿形弹性镇压辊的土壤坚实度差值为11.1~14.0 kPa,传统镇压辊的土壤坚实度差值为27.6~45.1 kPa,传统镇压辊的坚实度差值显著大于仿形弹性镇压辊的坚实度差值,因此,在土壤表面有一定倾角的条件下,仿形弹性镇压辊比相对传统镇压辊能更好地保证镇压的均匀性。

表5 取样点土壤坚实度差值测量结果

Tab.5 Measured results of soil compactness at sampling point

镇压辊类型	试验序号	取样点					kPa
		1	2	3	4	5	
仿形弹性镇压辊	1	10.3	13.0	18.7	1.6	26.0	
	2	20.1	4.5	5.3	13.7	10.0	
	3	11.6	17.8	9.2	17.3	3.8	
	平均值	14.0	11.8	11.1	10.9	13.3	
传统镇压辊	1	41.3	33.4	12.1	59.8	47.0	
	2	22.1	29.4	44.6	40.5	31.0	
	3	19.5	53.1	40.2	34.9	40.9	
	平均值	27.6	38.6	32.3	45.1	39.6	

### 3.3.3 压实效果

镇压作业后的土壤容积密度如表6所示。根据文献[21],大豆最适宜的土壤容积密度,东北黑土地区为1.0~1.3 g/cm<sup>3</sup>。从试验结果来看,仿形弹性镇压辊同传统镇压辊一样,均能达到适宜大豆生长的土壤容积密度。

表6 镇压后土壤容积密度

深度/mm	试验序号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0~100	1.14	1.20	1.24	1.15	1.21	1.23	1.14	1.20	1.23
100~200	1.21	1.24	1.28	1.23	1.24	1.28	1.20	1.24	1.30

## 4 结论

(1)设计了一种具有弹性辐条结构的仿形弹性镇压辊及其具有高度调节功能的辊架。通过理论分析和计算确定了镇压辊的主要结构参数:直径 $D=450$  mm,宽度 $B=210$  mm,弹性辐条数量 $n=12$ 。

(2)通过ADAMS运动仿真,采用控制变量法,结合机具的实际作业情况,得到各影响因素的最佳取值:刚度 $k=5\sim 7$  N/mm,载荷 $F=800$  N,作业速度 $v=0.5$  m/s,土壤坚实度 $P=15$  kPa。

(3)采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行土槽试验,考察了土壤干基含水率为20%时,通过极差分析和方差分析,得到影响镇压辊性能的因素的主次顺序为:载荷、弹簧刚度、土壤坚实度、作业速度,最优组合为:载荷 $F=800$  N,刚度 $k=5$  N/mm,土壤坚实度 $P=15$  kPa,作业速度 $v=0.5$  m/s,仿真结果与试验结果很好地吻合。在垄台表面有倾角的条件下,仿形弹性镇压辊能更好地保证镇压的均匀性。且仿形弹性镇压辊作业质量稳定,压实效果符合大豆种植农艺要求。

## 参 考 文 献

- 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):190-194,207.  
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, 207. (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)
- 吴普特,冯浩.中国节水农业发展战略初探[J].农业工程学报,2005,21(6):152-157.  
Wu Pute, Feng Hao. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 152-157. (in Chinese)
- 罗红旗,高焕文.免耕播种机组合镇压器设计研究[J].北京工商大学学报:自然科学版,2008,26(3):21-24.  
Luo Hongqi, Gao Huanwen. Study on combined press for permanent raised beds planter [J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2008, 26(3): 21-24. (in Chinese)
- 王景立,马旭,卢波,等.精密播种机可变量苗带镇压器的试验研究[J].吉林农业大学学报,2009,31(4):472-475.  
Wang Jingli, Ma Xu, Lu Bo, et al. Experimental study on seeding strip press roller with variable pressure of precision planter [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(4): 472-475. (in Chinese)
- 刘伟光,张印生,郭春雨.多功能碎土镇压器的设计[J].现代化农业,2011(2):38.
- 谢宇峰,许剑平,梁玉成.高速气吸式精密播种机的研制与开发[J].农机化研究,2010,32(11):87-90.  
Xie Yufeng, Xu Jianping, Liang Yucheng. The development of high speed precision suction seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 87-90. (in Chinese)
- Berti M T, Johnson B L, Henson R A. Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea [J]. Industrial Crops and Products, 2008, 27(3): 272-278.

- 10 王凯,刘厚林,袁寿其,等.离心泵叶轮轴面图的全自动CFD优化[J].农业工程学报,2011,27(10):39-43.  
Wang Kai, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Automatic optimization of impeller meridional shape for centrifugal pumps based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 39-43. (in Chinese)
- 11 张人会.离心泵叶片的参数化设计及其优化研究[D].兰州:兰州理工大学,2010.  
Zhang Renhui. The research on the parametric design of centrifugal pump blade and its optimization[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010. (in Chinese)
- 12 Derakhshan S, Pourmahdavi M, Abdolahnejad E, et al. Numerical shape optimization of a centrifugal pump impeller using artificial bee colony algorithm[J]. Computers & Fluids, 2013, 81: 145-151.
- 13 Kim J H, Oh K T, Pyun K B, et al. Design optimization of a centrifugal pump impeller and volute using computational fluid dynamics[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(3): 032025.
- 14 肖若富,陶然,王维维,等.混流泵叶轮反问题设计与水力性能优化[J].农业机械学报,2014,45(9):84-88.  
Xiao Ruofu, Tao Ran, Wang Weiwei, et al. Inverse design and hydraulic optimization of mixed-flow pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 84-88. (in Chinese)
- 15 谭磊,曹树良,桂绍波,等.离心泵叶轮正反问题迭代设计方法[J].农业机械学报,2010,41(7):30-35.  
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Centrifugal pump impeller design by using direct inverse problem iteration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 30-35. (in Chinese)
- 16 王秀礼,朱荣生,苏保稳,等.无过载旋流泵正交设计数值模拟与试验[J].农业机械学报,2012,43(1):48-52.  
Wang Xiuli, Zhu Rongsheng, Su Baowen, et al. Numerical simulation and experiment of Latin square design on non-overload vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 48-52. (in Chinese)
- 17 Zhou Ling, Shi Weidong, Wu Suqing. Performance optimization in a centrifugal pump impeller by orthogonal experiment and numerical simulation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(2013): ID385809.
- 18 Kim J H, Kim K Y. Analysis and optimization of a vaned diffuser in a mixed flow pump to improve hydrodynamic performance[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071104.
- 19 Luo X, Zhang Y, Peng J, et al. Impeller inlet geometry effect on performance improvement for centrifugal pumps[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(10): 1971-1976.
- 20 Lee Y T, Ahuja V, Hosangadi A, et al. Impeller design of a centrifugal fan with blade optimization[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2011(2011):ID537824.
- 21 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.

(上接第34页)

- 9 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.
- 10 胡鸿烈,孙福辉.单体仿形压轮式播种单组的设计与试验研究[J].农业机械学报,1996,27(10):53-57.  
Hu Honglie, Sun Fuhui. Study on designing and testing of the drill unit with individual profiling press wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(10): 53-57. (in Chinese)
- 11 贾洪雷,王刚,姜铁军,等.1GH-3型行间耕整机设计与试验[J].农业机械学报,2012,43(6):35-41,160.  
Jia Honglei, Wang Gang, Jiang Tiejun, et al. Design and experiment of 1GH-3 inter-row tillage machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6): 35-41, 160. (in Chinese)
- 12 Jia Honglei, Ma Chenglin, Li Guangyu, et al. Combined rototilling-stubble-breaking-planting machine[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1): 73-82.
- 13 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)
- 14 何进,李洪文,毛宁,等.玉米免耕播种深松联合作业机试验研究[J].农机化研究,2004,4(6):163-166.  
He Jin, Li Hongwen, Mao Ning, et al. Experiment and research on drilling and subsoiling combined machine for no-tillage maize[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004,4(6): 163-166. (in Chinese)
- 15 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- 16 成大先.机械设计手册:单行本.弹簧·起重运输件·五金件[M].北京:化学工业出版社,2004.
- 17 司海宝,蔡正银.基于ABAQUS建立土体本构模型库的研究[J].岩土力学,2011,32(2):599-603.  
Si Haibao, Cai Zhengyin. Development of static constitutive model library for soils based on ABAQUS[J]. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 599-603. (in Chinese)
- 18 于英杰,戈振扬,李厚春,等.土壤压实施肥机地轮滑移率影响的模拟[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集,2011.
- 19 赵振家,邹猛,薛龙,等.压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J].农业机械学报,2012,43(增刊):311-313.  
Zhao Zhenjia, Zhou Meng, Xue Long, et al. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 311-313. (in Chinese)
- 20 任露泉.试验优化设计与分析[M].长春:吉林科学技术出版社,2001.
- 21 曾德超.机械土壤动力学[M].北京:北京科学技术出版社,1995.