

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.005

玉米秸秆深埋还田机螺旋开沟装置参数优化与试验

高文英 林 静 李宝筏 马 铁
(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 在中国东北地区棕壤土玉米的生产过程中,通过秸秆深埋还田的方法,打破犁底层,在增加深层土壤肥力、蓄水保墒和构建合理耕层结构的同时,解决了秸秆有效处理问题。1JHL-2型秸秆深埋还田机能够对覆盖在地表的秸秆一次性完成粉碎、收集、开沟和掩埋作业。为了解决其开沟阻力大、整机受力不均和前进直线性差等问题,对其螺旋开沟装置进行了参数优化设计。针对开沟过程中叶片易粘土堵塞等问题,对螺旋开沟装置的螺旋叶片表面进行了仿生优化设计。通过动力学分析,确定出螺旋开沟装置的最佳结构参数。以玉米秸秆深埋率、开沟功耗和机组直线行驶最大偏移量为试验指标,以机具前进速度、开沟器转速和开沟深度为试验因素,进行三元二次回归正交旋转组合试验。试验结果表明:螺旋开沟器的最佳工作参数组合为:前进速度 1.04 m/s、开沟器转速 275 r/min、开沟深度 28.5 cm。在最优参数组合下,田间试验验证表明:秸秆深埋率的均值为 92.03%,开沟功耗均值为 17.7 kW,机组直线行驶最大偏移量为 74 mm,满足玉米秸秆深埋还田技术要求。

关键词: 秸秆深埋还田机; 合理耕层; 仿生; 螺旋; 参数优化

中图分类号: S224.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0045-10

Parameter Optimization and Experiment for Spiral Type Opener Device of Maize Straw Deep Bury and Returning Machine

GAO Wenying LIN Jing LI Baofa MA Tie
(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: During the process of maize production in brown soil in northeast of China, the method of deep burial straw returning can break the plow pan, increase the fertility of deep soil, store water, retain soil moisture and construct a reasonable plough layer structure. Besides, it also solved the problem of effective treatment of straw. The 1JHL-2 type deep burial straw returning machine can complete crushing, collecting, trenching and burying operation of straw that covered the surface at one time. In order to solve the problems such as large ditching resistance, uneven force of whole machine and poor linearity of advancement, the parameter optimization design was carried out on spiral type opener. For the problems of sticking with the soil and blocking easily during ditching, bionic optimization design was applied on the spiral blade surface. Through the kinetic analysis on spiral type opener device, the optimal structural parameters were finally determined. Taking the deep burial rate of straw, power consumption of trenching and maximum deviation of straight travel of the machine as experimental indexes, the forward velocity, rotate speed of spiral type opener and ditching depth as experimental factors, quadratic regression orthogonal rotational combing design with three factors was also used. The experimental results showed that forward velocity of 1.04 m/s, rotate speed of 275 r/min and ditching depth of 28.5 cm were the best parameter combination of working performance. With the optimal parameter combination, the average rate of straw deep burial reached 92.03%, the average power consumption of trenching was 17.7 kW and the maximum deviation of straight travel was 74 mm, which were verified experimentally in field and met the technical requirements.

Key words: straw deep bury and returning machine; reasonable plough layer; bionic; spiral; parameter optimization

0 引言

通过秸秆深埋还田,减少了秸秆焚烧所造成的环境污染,同时还能改良土壤结构,培肥地力^[1-6]。国内外秸秆还田机种类繁多,但是多数机具只能够实现地表直接还田或者浅层还田,玉米秸秆不易腐烂;地表还田春季易跑墒,影响作物出苗率。东北棕壤土旱地长期进行这种模式的秸秆还田,造成犁底层加厚并上移、土壤耕作层变浅,不利于玉米根系的生长,制约了玉米产量的提高。为此农学专家提出秸秆深埋还田,打破犁底层,构造合理耕层结构,以此来增强土壤肥力;同时,夏季雨水易在地下秸秆深层形成蓄水、纳水的“水库”而起到防涝的效果。

目前秸秆深埋还田机具尚处于研发阶段,相关的研究工作^[7-14]也逐渐增多。秸秆深埋还田功能实现的关键在于开沟装置,目前开沟深度大于25 cm的开沟器种类繁多,包括铧式开沟器、圆盘式开沟器、链式开沟器和螺旋式开沟器等。铧式开沟器开沟过程中,土壤沿犁曲面向上翻,容易板结成大块;圆盘式开沟器的开沟宽度和深度较难达到理想的目标;链式开沟器体积大、功耗高,多用于挖窄深沟;螺旋式开沟装置集立铣、升运和抛撒于一体,功效高、深度大、能耗低,并且尺寸较小,传动布局简单,开沟过程中不会形成较大土块,起到深松土壤作用。螺旋式开沟装置在园林、果园及农田开沟等领域已经得到了广泛应用^[15-19],林静等^[20]研制的1JHL-2型秸秆深埋还田机,首次将螺旋式开沟装置应用于秸秆深埋还田,达到了秸秆深埋还田技术要求,改良了土壤结构。

为了减小1JHL-2型秸秆深埋还田机的开沟阻力及解决螺旋叶片易粘土堵塞等问题,本研究对其关键部件螺旋开沟装置进行参数优化设计,实现深埋秸秆的同时提高其减粘降阻性能,通过优化求解获得螺旋开沟器的最佳参数组合。

1 整机结构与螺旋开沟装置方案设计

1.1 整机结构

螺旋式秸秆深埋还田机由机架、传动装置、秸秆粉碎装置、输送装置、螺旋开沟装置、落料装置和覆土镇压装置等组成,如图1所示。传动装置的布局如图2所示,拖拉机后置动力输出轴通过万向节将动力传至前置传动箱,前置传动箱改变传动方向,通过机具侧面带传动将动力传至秸秆粉碎刀轴,秸秆粉碎刀轴另一端通过链传动将动力传至后置传动箱。后置传动箱将粉碎刀轴传递过来的动力分别传至螺旋开沟器和上输送带轴,带动输送带运动,上输

送带轴另一侧通过带传动将动力传至螺旋覆土装置。

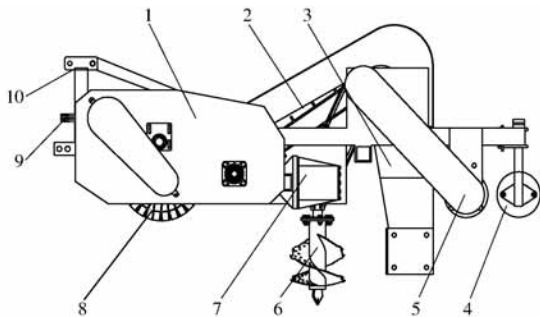


图1 螺旋式秸秆深埋还田机总体结构图

Fig. 1 General structure diagram of spiral type straw deep bury and returning machine

1. 机架 2. 输送装置 3. 落料装置 4. 镇压装置 5. 覆土装置
6. 螺旋开沟器 7. 后置传动箱 8. 秸秆粉碎装置 9. 前置传动箱 10. 悬挂装置

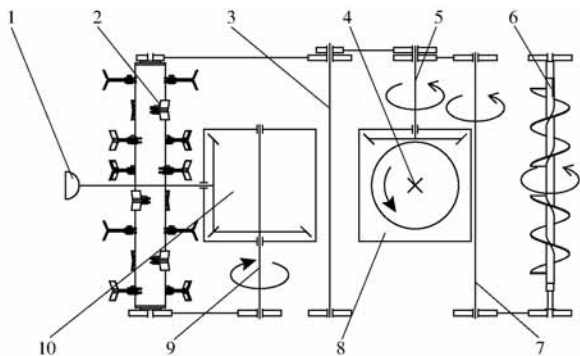


图2 传动系统布局

Fig. 2 Layout of transmission system

1. 万向传动轴 2. 秸秆粉碎轴 3. 输送装置下辊 4. 螺旋开沟轴 5. 后置传动箱动力输入轴 6. 螺旋覆土轴 7. 输送装置上辊 8. 后置传动箱 9. 前置传动箱动力输出轴 10. 前置传动箱

机具进行深埋作业时,秸秆粉碎轴进行反转产生负压,将秸秆打碎的同时将其向后抛起到输送带上,并输送至落料装置;与此同时,螺旋式开沟器开出深沟,落料装置内被打碎的秸秆落到沟内,最后通过螺旋覆土器将土壤向中间输送,填回沟内将秸秆覆盖,最后由镇压器将松土压实,达到耕层结构合理。

1.2 螺旋开沟装置设计方案

原1JHL-2型秸秆深埋还田机螺旋开沟装置的设计方案为单轴螺旋开沟,如图3a所示。田间试验时发现开沟器叶片堵塞严重,开沟阻力大,机具前进直线性差。文献[21]设计方案改用双轴螺旋开沟,以传动箱中间为基准对称布置,通过花键盘和传动箱链接,如图3b所示。双轴螺旋开沟解决了机具行走直线性差的问题^[22],但是机具整体结构较大,消耗功率升高。

优化的设计方案仍采用单轴螺旋开沟,从而保

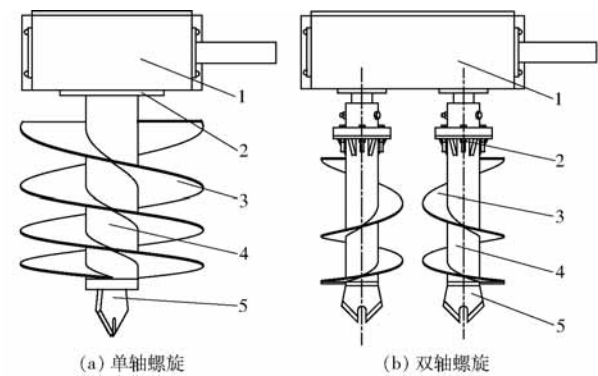


图3 螺旋开沟装置设计方案

Fig. 3 Designing scheme of spiral type opener device

1. 传动箱 2. 花键盘 3. 螺旋叶片 4. 刀轴 5. 刀头

证功耗低,结构简单紧凑;通过表面改形及仿生设计提高螺旋开沟器的减粘降阻特性;加大螺旋导程,从而增大输送空间,防止土壤堵塞叶片;并采用双螺旋叶片对称布置,解决开沟器受力不均问题,同时机具行进直线性差的问题也得到了解决;增强螺旋叶片及轴心的强度,叶片边缘增加切土刀片,防止开沟时受力较大,叶片产生变形。

2 螺旋开沟装置仿生表面设计

开沟装置在工作过程中,容易发生螺旋叶片表面粘土现象,导致沟形不齐、秸秆掩埋深度不够,甚至产生土壤堵塞叶片等现象。研究表明^[23-29],自然界生物与生俱来的非光滑表面具有良好的降阻和脱附作用。各种非光滑表面的共同点是,均由一系列一定形状的结构单元体按照一定规律或者随机的分布在体表而成。为了研究非光滑表面的脱附作用,取粘附在螺旋叶片的土壤进行分析,如图4所示。AB面为螺旋叶片与土壤的接触面,O点为土壤粘附区一点。当AB由平面变成曲面1,再由曲面1变至球面4的过程中,半径逐渐变小,曲面的曲率逐渐变大,导致粘附的面积逐渐变小,土壤最终脱落。由此可以看出,球面比平面和曲面更易导致土壤脱附。

蜣螂头部表面由一系列凸包分布而成,以其为

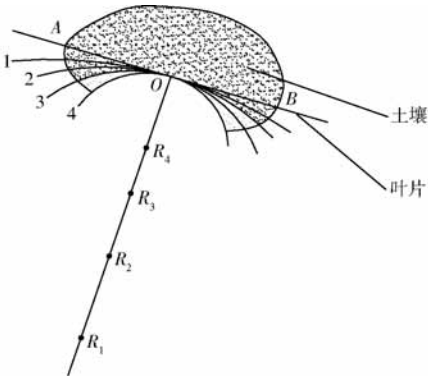


图4 土壤粘附仿生机理

Fig. 4 Bionic mechanism of soil adhesion

仿生原型,在螺旋叶片的表面焊接一系列球冠状的凸起。在螺旋叶片的输土过程中,土壤的粘附力主要体现在切向粘附和法向粘附。在切向方向,由于土壤不容易与凸起的表面相接触,从而在凸起的表面处形成较大的应力。当其切向分量大于粘附的摩擦力时,土壤即可产生运动,随即脱离螺旋叶片表面。在法向方向,由于凸起变形产生的变形能消耗,导致土壤与叶片表面的粘附力降低,当土壤内部的粘聚力大于土壤与叶片的粘附力时,即能使土壤产生脱附。另外,凸起亦能破坏光滑表面与土壤接触时产生的水膜的连续性,以减少粘附力,从而提高减粘降阻特性。

将螺旋叶片表面的凸起设计成球冠形,其外形尺寸设计为直径15 mm,采用不锈钢焊条堆焊而成,外侧凸起中心距叶片边缘40 mm,均匀布置24个;内侧凸起中心与其交错布置,与外侧凸起中心径向偏移35 mm。据此,设计的仿生螺旋开沟装置结构如图5所示。

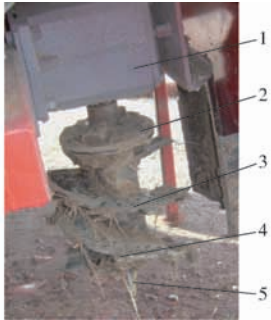


图5 仿生螺旋开沟装置结构图

Fig. 5 Bionic structure diagram of spiral type opener device

1. 传动箱 2. 花键盘 3. 螺旋叶片 4. 切土刀片 5. 刀头

3 螺旋开沟装置参数优化设计

3.1 运动学分析

螺旋开沟装置通过螺旋叶片高速旋转,切削土壤产生惯性力进行上升输送。为了简化被切下土壤的运动过程,将土壤看成单个颗粒,在叶片离心力作用下将其抛向坑壁;由于土壤颗粒与坑壁之间摩擦力的存在,使土粒的旋转角速度小于旋转刀轴的角速度;与此同时,由于螺旋叶片的倾斜上升形态,土壤颗粒在摩擦力及法向压力的作用下沿着螺旋叶片向上滑动上升,直至被抛出坑外^[30-31]。

如图6所示,螺旋面外缘半径 r 处,在摩擦力作用下,土壤颗粒 M 以速度 v_r 相对于叶片表面滑动,以绝对速度 v_a 的垂直分量 v_z 向上运动。绝对速度 v_a 可分解为牵连速度 v_e 和相对速度 v_r ,牵连速度 v_e 又可以分解为螺旋叶片圆周速度 v 和进给速度 v_s 。由图中的矢量关系可以得出

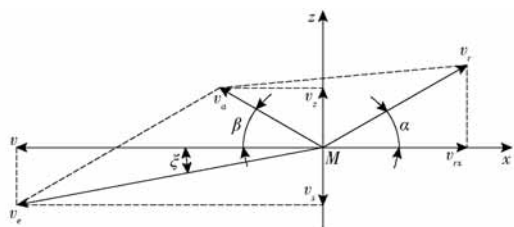


图6 螺旋开沟装置工作表面土壤颗粒速度分析

Fig. 6 Velocity analysis of soil particle on working surface of spiral type opener device

$$v_a \cos \beta = r\omega - (v_z + v_s) \cot \alpha \quad (1)$$

其中

$$v_a \cos \beta = \omega_a r$$

将公式(1)进行简化,得到开沟器向下挖坑时的角速度为

$$\omega = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha - \tan \xi} \omega_a \quad (2)$$

式中 α ——螺旋面半径 r 处的螺旋升角, ($^\circ$)

β ——土壤颗粒绝对速度与水平面夹角, ($^\circ$)

ξ ——牵连速度与水平面的夹角, ($^\circ$)

ω_a ——土壤颗粒绝对角速度, rad/s

当开沟器下降到指定的最低深度时,开沟器停止下降,随即向前进行直线开沟作业。这时只有水平前进的速度,即 $v_s = 0, \xi = 0^\circ$,代入公式(2),从而得到稳定工作状态下开沟装置的角速度为

$$\omega = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha} \omega_a \quad (3)$$

3.2 力学分析

在螺旋开沟装置开沟作业时,土壤沿着螺旋叶片边缘形成环状土流,根据土流在螺旋叶片位置的变化,半径越小所受的离心惯性力也逐渐减小,螺旋升角却增大。从而得知,从螺旋开沟器的外缘到内缘,主动力减小,阻力增加。随着半径的继续减小,绝对角速度 ω_a 增加,垂直上升速度 v_z 减小直至为零,土壤沿着螺旋面下滑,不能继续上升。

为了得到土壤能移动上升的条件,取 A 点为螺旋叶片上的土流单元, AC 为螺旋面构成线, AB 为螺旋面的一条切线, A 为切点, ABC 平面为螺旋面上 A 点处的切面,面 BCE 为面 ABC 垂直方向的投影, AD 为过 A 点的螺旋面的法线,结果如图7所示。

将重力 mg 和离心力 F_c 分别向切向 AC 和法向 AD 方向进行分解。在法向方向,土流单元所受作用力的合力为

$$F_N = mg \cos \beta + F_c \sin \beta \quad (4)$$

式中 F_c ——土流单元体所受的离心力, N

F_N ——法线方向土流单元受力合力, N

在切向方向上,土流单元所受摩擦力为

$$F = (mg \cos \beta + F_c \sin \beta) f_1 \quad (5)$$

式中 f_1 ——土壤与螺旋面的摩擦因数

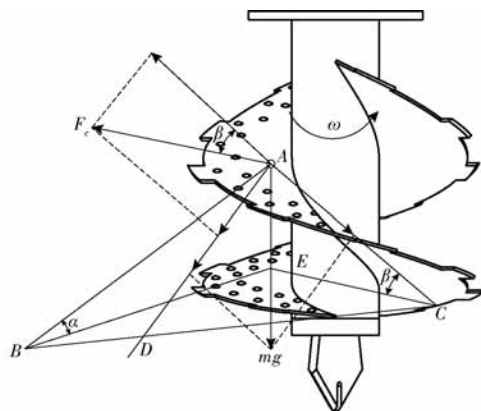


图7 螺旋开沟装置工作表面土流单元受力分析

Fig. 7 Force analysis of soil flow on working surface of spiral type opener device

为了保证土流单元能够上升运动,必须保证重力 mg 和离心力 F_c 在切向方向的合力大于摩擦力 F ,即得到土流单元体能够移动上升的条件为

$$\frac{mv^2}{r} \cos \beta - mg \sin \beta \geq F \quad (6)$$

3.3 螺旋叶片直径、小切土刀片及刀轴

螺旋开沟装置行驶于垄沟,机具收集两垄秸秆,实现垄沟隔行交替深埋。依据东北旱地棕壤土区玉米田的垄距及垄宽要求,确定开沟宽度不小于 350 mm。螺旋叶片直径 D 为

$$D = (0.92 \sim 0.98) D_0 \quad (7)$$

式中 D_0 ——开沟宽度, mm

选取叶片的直径 $D = 350$ mm,螺旋式开沟装置的最大开沟深度应达到 300 mm,故设计螺旋叶片的高度为 250 mm。刀尖可采用分叉形刀头,高度设计为 100 mm。分叉形刀头适合于中型机器作业,确保入土阻力小,在机组前进切削工作时,亦能保证工作可靠。

通过强度校核计算,刀具的轴心采用直径为 100 mm、壁厚为 10 mm 的钢管制成。同时,螺旋开沟装置不同于挖坑机,其在稳定工作状态下,主要依靠螺旋叶片对土壤进行切削而完成直线开沟作业,因此对螺旋叶片的结构及强度要求更高。螺旋叶片采用 8 mm 厚 65Mn 材料加工制作,并且进行热处理,焊接在主轴上,以此提高其强度。

为了减小螺旋开沟阻力,叶片边缘必须焊接小切土刀片,以完成对土壤的切削作用。切土刀片的数量过多会产生残余应力而引起叶片变形,数量过少则导致切削不连续,工作效率低且功耗增大。切土刀片均匀布置 20 个,两个刀片间的外螺旋线距离为 100 mm;为了减少刀片磨损,取刀片刃角为 30° 。为了保证初始状态下轴向的钻削挖坑作业,在最底端螺旋叶片起点对称安装一对端面切土刀片,保证

入土性能好,阻力小。

3.4 变螺距螺旋线方程的建立

为了防止土壤堵塞,螺旋叶片可以采取倒锥形螺旋柱式或变螺距圆柱式两种方式。倒锥形螺旋柱从下向上变宽,输土空间逐渐增大,开沟截面为梯形,因此不会产生堵塞现象;变螺距圆柱式螺旋开沟器,从下向上螺距增大,输土空间逐渐增大,开沟截面为矩形,结构相对简单,因此本机采取圆柱式变螺距螺旋开沟器。螺旋开沟装置通过螺旋叶片对土壤进行切削作业,为了防止作业时切削力矩作用不平衡,采取双头螺旋左右旋对称布置。

螺旋叶片是螺旋开沟装置的重要部件,其结构参数的设计直接影响着开沟效果。双头螺旋变螺距螺旋面可以看作是由两条变螺距螺旋线的无数切线所构成,变螺距螺旋线的形成原理如图8。母线上的一点A随着母线绕Z轴转动的同时,向上做等加速运动,动点A的轨迹 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_k$ 在ZOY面展开,随即形成一条抛物线。变螺距螺旋线的方程为

$$\begin{cases} x = r \cos(2\pi k_1) \\ y = r \sin(2\pi k_1) \\ z = a(2\pi r k_1)^2 + b(2\pi r k_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中 k_1 ——母线转动圈数

a ——二次项系数 b ——一次项系数

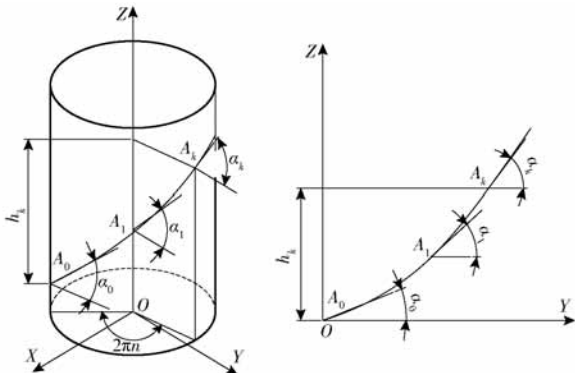


图8 变螺距螺旋线的形成原理

Fig. 8 Formation principle of variable pitch spiral

对此抛物线方程 z 进行求导,可得到任意一点的切线斜率为

$$\tan \alpha_k = 2a(2\pi r k_1) + b \quad (9)$$

当螺旋在初始位置时, $\alpha_k = \alpha_0, k_1 = 0, b = \tan \alpha_0$,则可得到二次项系数为

$$a = \frac{h_k - 2\pi r k_1 \tan \alpha_0}{(2\pi r k_1)^2} \quad (10)$$

式中 h_k ——螺旋线上任一点的上升高度,mm

螺旋线展开线上任一点 A_i 上升 k_1 圈的螺旋线升角为

$$\alpha_k = \arctan(4a\pi r k_1 + \tan \alpha_0) \quad (11)$$

为了减小切削功率,并防止堵塞,螺旋线一般采取较小的起始螺旋升角;为了防止土壤堵塞,尽量加大螺旋导程,本文取螺旋上升圈数为1圈。

3.5 螺旋开沟装置工作参数

为了满足土壤能够上升的条件,顺利完成对土壤的切削与提升,必须对螺旋开沟器螺旋叶片的螺旋角 α 、土壤颗粒绝对速度与水平面夹角 β 、螺旋叶片螺距 P 的变化范围及螺旋叶片的工作转速 n 进行分析。

螺旋叶片的螺旋角 α 随着叶片半径的增大而减小,此处所指为螺旋叶片外半径处的螺旋角,螺旋角 α 的选取直接影响升土的效果。为了降低切削功率,一般可选取较小的螺旋角^[32]。针对初始样机产生粘土及易堵塞输送空间的问题,将原方案初始螺旋角 α_0 由 9° 改为 6° 。

螺旋角的计算公式为

$$\alpha = \frac{P}{\pi D} \frac{360}{2\pi} \quad (12)$$

将 $P = 250 \text{ mm}, D = 350 \text{ mm}$ 代入公式(12),则计算得到最大螺旋角为 $\alpha = 12.94^\circ$,相应地可计算得到对应的螺距 P 变化范围为 $115 \sim 250 \text{ mm}$ 。

随着螺旋角减少到 12.94° ,螺旋开沟器向两侧抛土的距离也随之减小,开沟效率亦有所增加,这样更有利于开沟后覆土。

螺旋叶片的工作转速为

$$n = \frac{30}{\pi} F_r \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (13)$$

式中 F_r ——无因次相似准数,为 $2.5 \sim 4.5$

查阅农业机械设计手册得

$$F_r = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha - \tan \xi} \sqrt{\frac{\sin(\alpha + \varphi_1)}{f_2 \cos(\alpha + \varphi_1 + \beta)}} \quad (14)$$

式中 φ_1 ——土壤与螺旋叶片的摩擦角, $15^\circ \sim 40^\circ$

f_2 ——土壤的内摩擦因数, $0.8 \sim 1.1$

由公式(14)可知,土壤颗粒绝对速度与水平面夹角 β 是 F_r 取值的关键因素。 β 不是独立变量,它受螺旋角、转速及叶片半径的影响;当 β 取值较大时,螺旋叶片有更好的效率,从而使土壤更能顺利排出坑外。本装置的 β 角从下至上逐渐增大,取螺旋叶片底端 β 的最小值为 $20^\circ, \xi = 1^\circ, \varphi_1 = 30^\circ, f_2 = 1$ 时,代入公式(14)求得 $F_r = 3.7$,以此选取螺旋叶片的转速。

将 $F_r = 3.7$ 代入公式(13),计算求得对应的转速 n 为 265 r/min 。

螺旋叶片半径 r 处边缘一点的线速度计算公式为

$$v = \frac{n}{60} 2\pi r \quad (15)$$

当螺旋叶片外缘任一点的线速度在接近 10 m/s 时,切削力随线速度急剧下降。据此,将 $n = 265$ r/min 代入公式(15),计算求得螺旋叶片半径 r 处的线速度为 4.84 m/s,从而保证了开沟器有较大的切削力。

土壤颗粒的绝对速度与水平面夹角 β 随着变螺距螺旋叶片的上升而增大。根据公式(6)对土壤能否上升进行校核。此时取 $f_1 = 0.54$, $r = 0.175$ m, $v = 4.84$ m/s,由此验证在叶片最底端和最顶端两个极值时的土壤的升土性能。

在螺旋叶片最底端时取 $\beta_{\min} = 20^\circ$,代入式(6)进行验证,求得切向方向的合力为 122.5 N,摩擦力为 29.7 N,能够满足升土条件。

在螺旋叶片最顶端时取 $\beta_{\max} = 45^\circ$,代入式(6)进行验证,求得切向方向的合力为 87.7 N,摩擦力为 54.9 N,能够满足升土条件。

4 田间试验

4.1 田间试验条件与设备

2017年10月25日在铁岭市铁岭县蔡牛镇张庄合作社玉米试验田内进行田间试验,该地区为棕壤土,经过长期耕作后,犁底层较为紧实,透水性较差。试验田玉米留茬高度平均为 18 cm,行距

55 cm,平均株距 35 cm,秸秆粉碎处理后均匀铺撒。测得秸秆的直径为 12 ~ 25 mm,平均长度为 10 cm,平均秸秆覆盖量为 0.8 kg/m²。

使用 SM-2 型高精度土壤水分测量仪测定土壤含水率,5 cm 深处平均值为 22.8%,10 cm 深处平均值为 23.8%,15 cm 深处平均值为 25.6%,20 cm 深处平均值为 27.3%,25 cm 深处平均值为 28.9%。用 SC900 型土壤紧实度测量仪测量土壤坚实度,5 cm 深处平均值为 223.2 kPa,10 cm 深处平均值为 248.0 kPa,15 cm 深处平均值为 953.1 kPa,20 cm 深处平均值为 1 092.2 kPa,25 cm 深处平均值为 1 277.8 kPa。测试设备包括 AKC-205B 型扭矩传感器和 DT2236B 型转速测试仪、数据采集卡、数据处理终端等。螺旋开沟器安装在 1JHL-2 型秸秆深埋还田机上,配套动力采用 Deere1354 型拖拉机,机具的田间试验情况如图 9 所示。

4.2 试验影响因素和评价指标

4.2.1 试验影响因素

根据目前的研究可知,秸秆深埋还田机的作业效果主要受前进速度、开沟深度、开沟器转速、田间秸秆覆盖量、土壤含水率和坚实度等因素影响。在土壤含水率和坚实度相对稳定的条件下,确定前进速度、开沟器转速和开沟深度为田间试验的影响因素。



(a) 机具与拖拉机装配图



(b) 机具作业效果图



(c) 土壤纵向剖面秸秆分布图

图9 机具田间试验

Fig.9 Machine field test

4.2.2 试验指标

该机具研制的主要目的是在提高秸秆深埋率的同时,解决初始样机开沟阻力大、行驶直线性差的问题,因此将秸秆深埋率、开沟功耗和机组直线行驶最大偏移量作为试验指标。

秸秆深埋率的计算式为

$$Y_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (16)$$

式中 Y_1 ——秸秆深埋率,%

m_1 ——取样点作业前单位面积秸秆质量,kg

m_2 ——取样点作业后单位面积秸秆质量,kg

每组试验机具前进 50 m,随机在其工作区域选取 10 个 120 cm × 60 cm 的矩形区域,称量统计后取

平均值,进行秸秆深埋率计算。取机具前进中间 20 m 区域为功耗数据采集区,每隔 2 m 选取一个测试点进行数据记录,求出 10 个测试点的平均值,作为每次试验功耗测试数据。在机具前进 50 m 行程两端中心点处拉线,保证其直线度,作为直线偏移量的测量基准。等间距选取 10 个测量点,用钢卷尺测量沿行程垂直方向沟壁边缘与基准线的距离,计算出最大偏移量。

4.3 试验方案及结果分析

4.3.1 试验方案

试验以前进速度、开沟器转速、开沟深度作为影响因素,分别设置 3 个因素水平,试验因素的编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	试验因素		
	前进速度 x_1 /	开沟器转速 x_2 /	开沟深度 x_3 /
	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	cm
1. 682	1. 58	303	31. 4
1	1. 39	290	30
0	1. 11	270	28
-1	0. 83	250	26
-1. 682	0. 64	237	24. 6

田间试验的目的是确定不同的影响因素对试验指标的影响规律,寻找一组最佳的因素参数组合从而使试验指标达到最优值。首先通过 Design-Expert 对回归方程进行检验,判断回归方程的类型,通过极差和方差分析确定试验因素对指标的影响并排序,最后通过对回归方程求最优解,求出最佳组合^[33]。试验共进行 23 次,其中零水平组合重复 4 次,每组试验机具前进 50 m,试验方案与结果如表 2 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 的编码值。

表 2 试验方案及结果

Tab.2 Experimental project and results

试验 序号	因素			指标		
	X_1	X_2	X_3	深埋率	功耗	最大偏移量
				$Y_1/\%$	Y_2/kW	Y_3/mm
1	-1	-1	-1	88. 62	16. 98	80
2	1	-1	-1	86. 56	18. 93	83
3	-1	1	-1	90. 57	17. 43	78
4	1	1	-1	85. 81	19. 34	82
5	-1	-1	1	87. 62	18. 91	88
6	1	-1	1	88. 56	19. 52	96
7	-1	1	1	90. 78	19. 87	83
8	1	1	1	88. 61	21. 15	92
9	-1. 682	0	0	89. 59	18. 49	54
10	1. 682	0	0	86. 11	20. 26	86
11	0	-1. 682	0	88. 21	17. 45	74
12	0	1. 682	0	90. 79	19. 27	48
13	0	0	-1. 682	88. 11	17. 14	62
14	0	0	1. 682	89. 61	20. 53	80
15	0	0	0	92. 11	17. 49	79
16	0	0	0	91. 59	17. 74	58
17	0	0	0	92. 12	18. 05	78
18	0	0	0	91. 97	17. 88	74
19	0	0	0	91. 58	17. 77	82
20	0	0	0	91. 45	18. 16	74
21	0	0	0	92. 04	18. 23	66
22	0	0	0	91. 39	17. 58	72
23	0	0	0	91. 82	17. 89	78

4.3.2 试验结果分析

针对试验结果,应用 Design-Expert 软件对其进行回归分析,以确定试验指标在不同试验因素影响下的变化规律,深埋率的回归方程的显著性分析结果如表 3 所示。

由方差分析结果可知,前进速度、开沟器转速和

表 3 正交试验方差分析(深埋率)

Tab.3 Variance analysis result of orthogonal test

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F	P	显著性
X_1	14. 15	1	14. 15	196. 35	<0. 000 1	**
X_2	5. 60	1	5. 60	77. 76	<0. 000 1	**
X_3	3. 12	1	3. 12	43. 35	<0. 000 1	**
X_1X_2	4. 22	1	4. 22	58. 54	<0. 000 1	**
X_1X_3	3. 91	1	3. 91	54. 19	<0. 000 1	**
X_2X_3	0. 51	1	0. 51	7. 01	0. 020 1	*
X_1^2	32. 25	1	32. 25	447. 45	<0. 000 1	**
X_2^2	11. 25	1	11. 25	156. 04	<0. 000 1	**
X_3^2	18. 11	1	18. 11	251. 26	<0. 000 1	**
模型	92. 34	9	10. 26	142. 34	<0. 000 1	**
残差	0. 94	13	0. 072			
失拟	0. 27	5	0. 054	0. 65	0. 670 9	
误差	0. 67	8	0. 083			
总和	93. 28	22				

注: **表示极显著, * 表示显著。

开沟深度均对秸秆深埋率的影响极显著,因素两两之间存在交互作用。回归模型极显著,失拟项 $P > 0. 05$,说明回归方程和试验数据的拟合程度良好。通过对回归方程系数的检验,确定试验因素对试验指标的影响大小顺序为 X_1 、 X_2 、 X_3 。深埋率的因素编码回归方程为

$$Y_1 = 91. 79 - 1. 02X_1 + 0. 64X_2 + 0. 48X_3 - 0. 73X_1X_2 + 0. 70X_1X_3 + 0. 25X_2X_3 - 1. 46X_1^2 - 0. 84X_2^2 - 1. 07X_3^2 \quad (17)$$

运用同样的方法,剔除不显著项,得到功耗的因素编码回归方程为

$$Y_2 = 17. 86 + 0. 64X_1 + 0. 48X_2 + 0. 91X_3 - 0. 25X_1X_3 + 0. 22X_2X_3 + 0. 55X_1^2 + 0. 20X_2^2 + 0. 36X_3^2 \quad (18)$$

通过对回归方程系数的检验,确定试验因素对开沟功耗的影响大小顺序为 X_3 、 X_1 、 X_2 。

通过对功耗方差分析可知,3 个因素对功耗的影响均显著,并且前进速度和开沟深度、开沟器转速和开沟深度之间存在交互作用。

对于机组直线行驶的最大偏移量,剔除不显著项,得到最大偏移量因素编码的回归方程为

$$Y_3 = 68. 80 + 5. 75X_1 - 2. 01X_2 + 8. 55X_3 - 3. 13X_1X_3 + 4. 41X_1^2 + 1. 76X_2^2 + 2. 65X_3^2 \quad (19)$$

通过对机组直线行驶的最大偏移量方差分析可知,3 个因素对其影响均显著,并且前进速度和开沟深度之间存在交互作用。

4.3.3 试验因素对试验指标的影响分析

通过 Design-Expert 中的 3D Surface model graphs 能够直观展示各个试验因素对试验指标的影响,如图 10 所示。由图 10a、10b、10c 可知,深埋率随着前进速度的提高先增后降,在 0 水平附近取得最大值;随着开沟器转速的提高先增大后小幅度减

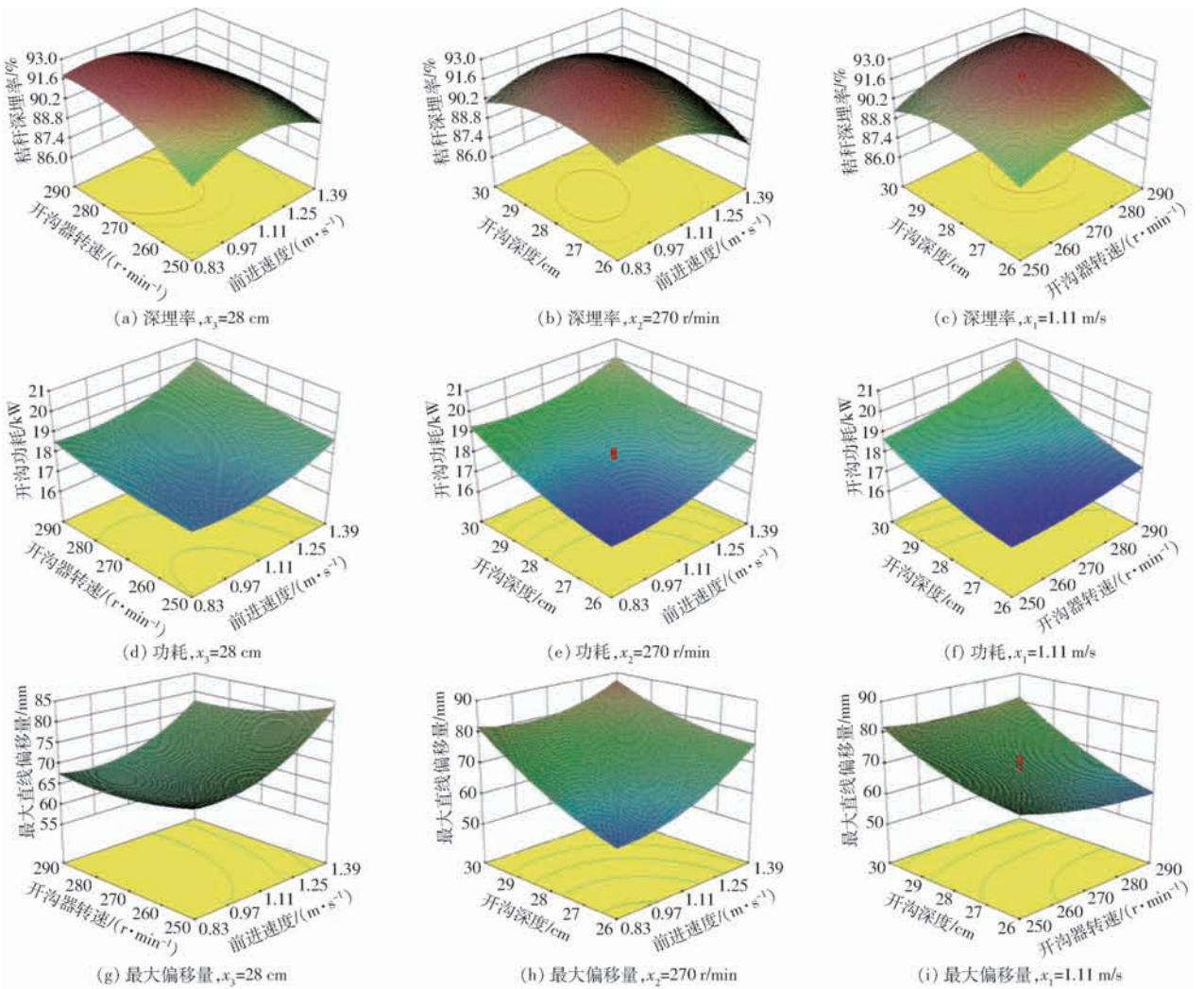


图 10 试验因素对指标的影响

Fig. 10 Influence of test factors on indexes

小;随着开沟深度的增大先增后降,在 0 水平附近取得最大值。由图 10d、10e、10f 可知,开沟功耗随着前进速度、开沟器转速及开沟深度的提高而增大。由图 10g、10h、10i 可知,机组直线行驶最大偏移量随着前进速度、开沟深度的提高而增大,随着开沟器转速的提高呈现减小趋势。

4.4 参数优化

为寻找因素区间内的最优因素水平组合,结合试验因素的约束条件,对得到的回归方程求最优解。根据试验得到的初步结果,以最大秸秆深埋率为评价指标,建立数学模型

$$\begin{cases} F_{\max} = Y_1 \\ \begin{cases} Y_1 \geq 87\% \\ Y_2 \leq 20 \text{ kW} \\ Y_3 \leq 90 \text{ mm} \end{cases} \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1.58 \text{ m/s} \geq x_1 \geq 0.64 \text{ m/s} \\ 303 \text{ r/min} \geq x_2 \geq 237 \text{ r/min} \\ 31.4 \text{ cm} \geq x_3 \geq 24.6 \text{ cm} \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

针对回归方程,应用 Design-Expert 对其进行优化求解,优化参数结果为:前进速度 1.04 m/s,开沟器转速 275 r/min,开沟深度 28.5 cm 时,深埋率为 92.14%,开沟功耗为 17.9 kW,直线行驶最大偏移量为 68 mm。

4.5 验证试验

为验证优化结果的准确性,进行了田间验证试验。验证试验在同一试验田隔天进行,土壤含水率和土壤坚实度基本维持在相对稳定的状态。试验时,按照最优参数组合确定机具的前进速度为 1 m/s、开沟器转速为 275 r/min、开沟深度为 28.5 cm。验证试验在试验田中随机选取 7 个地块,在每个地块分别进行一次验证试验,机具前进的距离不小于 50 m,验证试验的结果取 7 次试验的平均值,如表 4 所示。可以看出,在理论计算分析所选择的参数下,优化结果与田间验证结果基本相符。

表 4 田间验证试验结果
Tab.4 Result of field validation test

试验指标	试验序号							平均值
	1	2	3	4	5	6	7	
深埋率 $Y_1/\%$	90.7	92.0	93.1	92.2	92.6	92.3	91.3	92.03
功耗 Y_2/kW	17.6	17.3	17.1	18.2	17.4	18.3	17.9	17.7
最大直线偏移量 Y_3/mm	64	68	74	70	56	67	73	67

5 结论

(1)依据东北平原中南部棕壤土区合理耕层构建的秸秆深埋还田技术要求,结合运动学计算分析,对螺旋开沟装置进行了参数优化设计。螺旋开沟装置采取圆柱式双头螺旋变螺距设计,螺旋叶片边缘增加小切土刀片,并对螺旋叶片表面焊球冠状仿生凸起,满足了开沟深度、宽度及秸秆深埋率等要求,并解决了叶片粘土易堵塞等问题。

(2)建立了秸秆深埋率、开沟功耗、直线行驶最大偏移量与前进速度、开沟器转速、开沟深度 3 个试验因素的回归数学模型,得到了 3 个因素对秸秆深埋率的影响规律,确定试验因素对试验指标的影响

顺序为前进速度、开沟器转速、开沟深度;同时也确定了 3 个因素对开沟功耗和直线行驶最大偏移量的影响规律和交互关系。

(3)在平均秸秆覆盖量为 0.8 kg/m^2 、秸秆平均长度为 10 cm 的玉米秸秆茬地,当参数优化组合为:机具前进速度 1.04 m/s 、开沟器转速 275 r/min 、开沟深度 28.5 cm ,此时秸秆深埋率为 92.14% ,开沟功耗为 17.9 kW ,直线行驶最大偏移量为 68 mm 。

(4)田间验证试验表明,在最佳参数组合下,秸秆深埋率的平均值为 92.03% ,开沟功耗平均值为 17.7 kW ,直线行驶最大偏移量为 74 mm ,达到了秸秆深埋还田技术要求,可为秸秆深埋还田机开沟装置的设计和改制提供一定的理论参考。

参 考 文 献

1 朱立志,冯伟,邱君. 秸秆产业的国外经验与中国的发展路径[J]. 世界农业,2013(3):114-117.

2 李银领,郭书亚,卢广远. 秸秆还田效应探讨[J]. 现代农业科技,2016(2):264-265.

3 申源源,陈宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(19):291-294.

SHEN Yuanyuan, CHEN Hong. The progress of study on soil improvement research with straw stalk[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(19):291-294. (in Chinese)

4 梁卫,袁静超,张洪喜,等. 东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J]. 东北农业科学,2016,41(2):44-49.

LIANG Wei, YUAN Jingchao, ZHANG Hongxi, et al. Research progress on mechanism and related technology of corn straw returning in northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(2):44-49. (in Chinese)

5 刘卉,周清明,黎娟. 秸秆还田对土壤改良及作物生长影响的研究进展[J]. 中国农学通报,2017,33(32):53-57.

LIU Hui, ZHOU Qingming, LI Juan. Effect of straw returning on soil improvement and crop grows: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(32):53-57. (in Chinese)

6 YANG Haishui, XU Mingmin, KOIDE R T, et al. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(4):1141-1149.

7 宋健鹏,林静,马铁,等. 旋转铧式玉米秸秆深埋还田机的设计[J]. 农机化研究,2018,40(2):95-99.

SONG Jianpeng, LIN Jing, MA Tie, et al. Design and test rotating spade type maize straw returning root deep machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2):95-99. (in Chinese)

8 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):112-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.

WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):112-117. (in Chinese)

9 杨鹏,王瑞丽,张启辉,等. 秸秆深还机具特点和作业效率分析[J]. 吉林农业大学学报,2016,38(5):645-650.

YANG Peng, WANG Ruili, ZHANG Qihui, et al. Analysis of characteristics and working efficiency of corn straw deep soil returning machine[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38(5):645-650. (in Chinese)

10 王喜艳,窦森,张恒明,等. 玉米秸秆持水深埋对辽西瘠薄耕地土壤养分及玉米产量的影响[J]. 西北农业学报,2015,23(5):76-81.

WANG Xiyan, DOU Sen, ZHANG Hengming, et al. Effects of waterlogged maize stalk deep returning on soil nutrients and maize yields of barren farmland in west Liaoning Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2015, 23(5):76-81. (in Chinese)

- 11 李真. 玉米整秆深埋还田试验[J]. 山西农业科学, 2014, 42(4): 349–352.
LI Zhen. Experiment of whole maize straw returned to deep furrow and buried under ridge[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(4): 349–352. (in Chinese)
- 12 王川, 邵陆寿, 施六林, 等. 秸秆深埋保护性耕作复合机具设计[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 117–120.
WANG Chuan, SHAO Lushou, SHI Liulin, et al. Design of compound equipment with the deep straw and conservation tillage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 117–120. (in Chinese)
- 13 朱家广, 王新华. 1L–120SM 型根茬秸秆深埋犁[J]. 农业机械, 1999(8): 29.
- 14 李永磊, 宋建农, 康小军, 等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130609&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.009.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45–49. (in Chinese)
- 15 韩永俊, 尹大庆, 冯江, 等. 1KL–100 型立式螺旋开沟机的设计[J]. 农机化研究, 2000, 22(4): 66–68.
- 16 李婧. 立式螺旋开沟器及开沟机整机特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
LI Jing. Research on upright helix furrowing opener and characteristics of ditching machine[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 17 曹中华. 果园开沟部件运动参数及结构参数仿真与优化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
CAO Zhonghua. Simulation and optimization of kinematic parameters and structural parameters of ditching component in orchard[D]. Chongqing: Southwest University, 2017. (in Chinese)
- 18 马爱丽. 基于 LS–DYNA 果园螺旋开沟机模拟试验研究及其优化设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
MA Aili. Study on LS–DYNA-based simulation experiment and its optimization design for orchard spiral ditcher[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 19 薛子萱. 立式螺旋开沟机工作部件设计及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
XUE Zixuan. Design and optimization of working parts in upright screw ditcher[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- 20 林静, 马铁, 李宝筏. 1JHL–2 型秸秆深埋还田机设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 32–40.
LIN Jing, MA Tie, LI Baofa. Design of 1JHL–2 type straw deep bury and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 32–40. (in Chinese)
- 21 林静, 马铁, 高文英, 等. 秸秆深埋还田机螺旋开沟装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(1): 41–48.
LIN Jing, MA Tie, GAO Wenying, et al. Design and experiment of spiral milling cutter device of straw deep bury and returning machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(1): 41–48. (in Chinese)
- 22 周波. 双轴立式螺旋开沟机工作部件切土性能研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- 23 戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2353–2359.
- 24 TONG Jin, MOAYAD B Z, MA Yunhai, et al. Effects of biomimetic surface designs on furrow opener performance[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(3): 280–289.
- 25 SALOKHE V M, SHIRIN A K. Effect of enamel coating on the performance of a disc plough[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 53(1): 71–80.
- 26 马云海, 马圣胜, 贾洪雷, 等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36–41.
MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionicripple opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36–41. (in Chinese)
- 27 何龙飞, 孙友宏, 高科, 等. 仿生非光滑螺旋钻头的设计及试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(2): 300–304.
HE Longfei, SUN Youhong, GAO Ke, et al. Experiments and design of bionic non-smooth spiral bit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(2): 300–304. (in Chinese)
- 28 高峰, 孙慧, 肖林京, 等. 凸包形仿生非光滑表面的脱附性能研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(4): 56–59.
GAO Feng, SUN Hui, XIAO Linjing, et al. Study on desorption of bionic convex-hull-shaped non-smooth surface[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(4): 56–59. (in Chinese)
- 29 荣长发, 马成林, 张守勤. 疙瘩开沟器减粘降阻机理及试验研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 124–128.
RONG Changfa, MA Chenglin, ZHANG Shouqin. Mechanism of reducing soil adhesion and drag resistance of lumpy furrow opener[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 124–128. (in Chinese)
- 30 黄仁楚. 营林机械理论与计算[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- 31 李平, 蒋恩臣, 丁乔. 立轴柱形变螺距螺旋开沟机临界转速分析[J]. 农机化研究, 2015, 27(1): 129–130, 133.
LI Ping, JIANG Enchen, DING Qiao. A research on the critical speed of the upright cylinder helix ditching machine of the variable pitch[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 27(1): 129–130, 133. (in Chinese)
- 32 黄文光. 立轴螺旋开沟机设计[J]. 新疆农机化, 1996(3): 31–32.
- 33 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.