

秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验

林 静 张桐嘉 田 阳 高文英 齐 林 李宝筏

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要:为解决秸秆深埋还田工作中开沟深度不够、深埋率低、开沟阻力大等问题,对自行研制的气力式秸秆深埋还田机的开沟装置进行了优化设计。提出一种仿螳螂前端足曲线的秸秆开沟刀参数优化设计,利用阿基米德等进螺旋线设计的侧切刃具有滑切能力,可切割土壤完成开沟作业。利用 Matlab 对螳螂前端足进行二值化、膨胀、边缘坐标处理得到仿生开沟刀,使用离散元软件 EDEM 对设计出的仿生开沟刀和普通开沟刀进行仿真对比,并对仿真结果进行土槽试验验证。试验分析结果表明,相比于普通开沟刀,仿真开沟刀在开沟过程中可减少 9.48% 的阻力。利用 Design-Expert 8.0 软件的二次正交旋转组合试验设计结合响应面法,分别建立秸秆深埋率和工作效率与机具前进速度、秸秆深埋深度和秸秆覆盖量的回归数学模型。通过分析表明,各因素对秸秆深埋率的影响由大到小依次为:秸秆覆盖量、秸秆深埋深度、机具前进速度;各因素对工作效率的影响由大到小依次为:机具前进速度、秸秆深埋深度、秸秆覆盖量;交互作用中,秸秆深埋深度和秸秆覆盖量、机具前进速度与秸秆覆盖量对工作效率影响显著。经过优化求解,在深埋率权重为 0.7、工作效率权重为 0.3 的情况下得到开沟装置最佳工作参数,在机具前进速度为 1.63 m/s、秸秆深埋深度为 27.97 cm、秸秆覆盖量为 340.54 kg/hm²时,秸秆深埋率为 90.491%,工作效率为 5.4 hm²/h。

关键词: 秸秆深埋还田; 仿生; 图像处理; 仿真模型; 试验设计

中图分类号: S224.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0050-10

Optimization and Experiment on Bionic Deep-buried Device for Returning Straw in Field

LIN Jing ZHANG Tongjia TIAN Yang GAO Wenying QI Lin LI Baofa

(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient depth of trenching, low depth of deep-buried, high resistance to trenching in straw returning work, the design of trenching device for pneumatic straw returning to field was optimized. A parameter optimization design of the deep-buried straw was proposed to simulate the front-foot curve of the rake, and the cutting ability of the side cutting edge designed by Archimedes' helical design was used to cut the soil to complete the trenching operation. Matlab was used to reduce the resistance and consumption during the trenching operation of the bionic part obtained by binarization, expansion and edge coordinate processing of the front foot, and then the discrete element software EDEM was used to design the bionic trencher and the ordinary trencher. The simulations were compared and the simulation results were verified by the soil trough test. The analysis of the test results showed that the simulation trencher can reduce the resistance by 9.48% compared with the ordinary trencher during the trenching process. The quadratic orthogonal rotation combination design of Design-Expert 8.0 software was used in combination with response surface methodology to establish a regression mathematical model for deep burying rate and operating efficiency of the straw, speed of implement advancement, deep burial depth of straw and straw mulching amount. The analysis result showed that the order of the factors affecting the deep burial rate of straw in a descending trend was straw coverage, deep burial depth of straw and tool advancement speed; the effect of each factor on work efficiency was the speed of implement advancement, deep burial depth of straw and straw cover; interaction in depth of straw depth and straw coverage, machine tool speed and straw coverage had a significant impact on work

收稿日期: 2018-07-12 修回日期: 2018-08-07

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503116-09)和辽宁省农村经济委员会与质量技术监督局地方标准项目(2016160-27)

作者简介: 林静(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究,E-mail: synydxlj69@163.com

efficiency. After optimization, the optimal working parameters of the trenching device were achieved with deep buried rate weight of 0.7 and work efficiency weight of 0.3. The forward speed of the implement was 1.63 m/s, the deep buried depth was 27.97 cm, and the straw coverage was 340.54 kg/hm², the depth buried rate of straw was 90.491%, and the working efficiency was 5.4 hm²/h. The analysis result showed that the optimized work effect was in line with the straw agronomy requirements. The research results can provide a theoretical reference and basis for the optimal design of trenching device for deep returning of corn straw.

Key words: deep buried straw returning; biomimetic; image processing; simulation model; experimental design

0 引言

据统计,国内平均每年产生的秸秆总量约为6.2亿t,超过化肥总产量的1/4,但近年秸秆资源的利用率却逐年降低,农民为赶农时将大量秸秆焚烧,在严重浪费农作物资源的同时,产生了大量的有害气体,蒸发了土壤的水分,矿化了土壤的腐殖质和有机质,改变了土壤的物理性状,造成土壤板结、水分流失,已严重破坏了我国农业生产和环境保护。秸秆就地还田是解决秸秆资源利用率低的有效途径之一,不仅从根本上杜绝了秸秆焚烧,而且可以提高土壤肥力,改善土壤耕层结构,促进农作物生产良性循环^[1-14]。秸秆还田增肥增产作用显著,一般可增产5%~10%。但若方法不当,秸秆还田后使土壤变得过松,孔隙大小比例不均,导致跑风,土壤与种子不能紧密接触,使作物苗期扎根不牢,甚至出现吊根,影响种子发芽生长。若秸秆还田量过大或不均匀,易发生土壤微生物与作物幼苗争夺养分。东北地区一般每公顷秸秆粉碎翻压还田不少于4500kg,最多不超过7500kg,否则会影响秸秆在土壤中的分解速度及作物产量^[15-20]。

机械化秸秆还田包括秸秆粉碎还田、根茬粉碎还田、整秆翻埋还田等多种形式,具有便捷、快速、低成本、大面积培肥地力的优势,是一项较为成熟的技术。如毛罕平等^[21]研究的秸秆粉碎掩埋复式作业机;陈翠化^[22]研究的带状灭茬机,能够进行带状作业,将作业带的秸秆掩埋还田。针对秸秆集中还田的问题,付乾坤等^[23]研究了玉米灭茬起垄施肥播种机。

有关对秸秆还田技术的研究中对开沟刀的性能研究尤为重要。文立阁^[24]利用现代仿生技术对主要灭茬部件进行改型,利用仿蛄蛄的开掘爪趾得到生物特征参数对灭茬刀进行设计,达到节能降阻的目的,为仿生灭茬刀辊减阻设计提供可靠的分析与预测方法。李常营^[25]利用Matlab对棉蝗上颚的轮廓进行曲线拟合,对玉米收获机的切割装置进行设计,并对仿生锯齿刀片和普通锯齿刀片进行对比试

验,得到的仿生刀片具有明显的降低能耗作用,为今后切割部件的设计提供了参考。汲文峰^[26]以鼯鼠爪趾为仿生原型,综合运用农机具设计方法及仿生技术,进行旋耕-碎茬通用刀片和旋耕-碎茬仿生刀片的设计及试验研究,在室内土槽对其分别进行旋耕和碎茬试验,为实现旋耕-碎茬作业的通用及驱动型耕作机具关键部件的优化设计提供了技术参考。郭俊等^[27]研究了一种仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片,该刀片可同时完成秸秆粉碎和旋耕混拌的效果,减少了配套机具的功耗。王庆杰等^[28]设计了一种保护性耕作双翼浅松刀,作业后地表秸秆覆盖量为39.5%,满足了保护性耕作条件下的浅松要求。

按照辽宁省玉米秸秆还田的农业要求,针对开沟阻力大、秸秆深埋深度不够、秸秆深埋率低、机具作业效率低的问题,本文优化设计一种仿生开沟装置,为秸秆深埋还田机的改进设计提供关键部件参照依据。

1 开沟装置结构与设计原理

1.1 结构

仿形开沟装置结构如图1所示。主要包括开沟刀盘和两种样式对称设计的左右仿生开沟刀。两种开沟刀对称交错安装,分别切开开沟刀盘两侧的土并起到抛土的作用。工作时拖拉机的动力经过齿轮箱带动刀盘旋转,同时带动机具水平向前运动。刀轴的旋转为刀具提供角速度,带动刀具做余摆线运动切土开沟。刀轴上同时安装两个刀盘,刀盘间距离可以调整以满足不同开沟宽度的作业。

1.2 设计原理

开沟装置是在前部装置将秸秆完成收集后的地面进行工作,故本开沟刀既需要良好的土壤切割性能,也需要能开出满足秸秆深埋深度要求的沟。螳螂前足上的齿形结构可以增强开沟刀的切割性能并减少仿生开沟刀和土壤之间的摩擦阻力。仿生开沟刀的刀刃端点的绝对速度是机具前进速度和刀盘转动时刀刃端点相对于轴心的回转运动所带来的线速

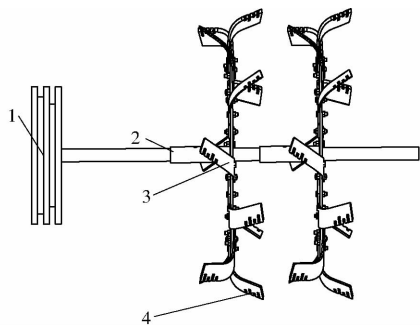


图 1 开沟装置结构

Fig. 1 Ditching device structure

1. 动力带轮 2. 开沟刀盘 3. 左仿生开沟刀 4. 右仿生开沟刀

度的速度矢量和。在机器工作时,开沟刀刀端点的瞬时速度对整个开沟装置和整台机器的工作性能存在巨大的影响,刀轴转速的确定对研究机具的作业效果有着显著的影响。

以机具前进方向为正方向,过回转中心平行位置的轴线为 X 轴,回转中心垂直地面的轴线为 Y 轴。研究开沟刀尖端在回转工作形成的余摆线轨迹来决定刀轴的开沟速比,如图 2 所示。

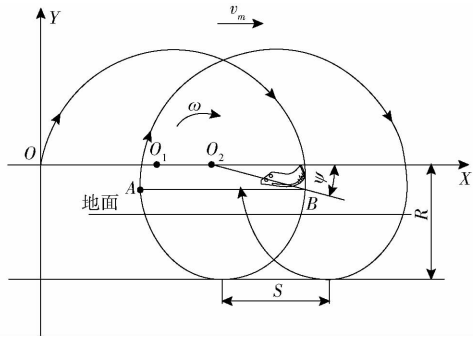


图 2 开沟刀尖端轨迹

Fig. 2 Trenching knife tip track

$$\begin{cases} x = R\cos\omega t + v_m t \\ y = R\sin\omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_m ——机具前进速度, m/s

R ——开沟刀回转半径,取 300 mm

ω ——开沟刀旋转角速度, rad/s

t ——机具工作时间, s

机具的前进速度和开沟刀的端点线速度的比值为开沟速比 $\lambda = R\omega/v_m$ 。当 $\lambda > 1$ 时,开沟刀的运动轨迹为余摆线,可保证开沟刀的端点运动方向向后,使刀片不会产生向前推土现象,同时减少功耗。当机具前进速度为 1.25 m/s 、刀轴转速 n 为 300 r/min 、回转半径为 300 mm 时,求得 λ 为 7.536 。

由图 2 可得出,当开沟刀外刃在 B 点下土时,刀具在水平方向的分速度向机具后方,所以当刀具入土点在 B 点下土时,切出的土块会向机具后方抛出,减少机具消耗,提高作业效率。在图中余摆线最大横弦 AB 时的开沟深度 h 、转动角、机具移动距离为

$$h = R - R\sin\varphi_0 = R\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \quad (2)$$

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

$$a = v_m t = v_m \frac{\varphi_0}{\omega} \quad (4)$$

式中 φ_0 ——刀齿在最大横向运动幅宽时与轴心线的夹角, rad

经计算 h 为 260 mm ,机具在最大横向运动幅宽时,刀具转过角 φ_0 为 0.0886 rad ,机具前进距离 a 为 3.53 mm 。切土节距为

$$S = 2\pi \frac{v_m}{\omega z} \quad (5)$$

式中 S ——切土节距, cm

z ——同一刀盘上安装的开沟刀数量,个

仿生开沟刀设计切土节距为 11 cm 。在该切土节距下,同一刀盘上安装的开沟刀数量 $z = 2.3$,向上取整得同一刀盘上安装 3 把开沟刀,满足机具设计要求。

2 仿生开沟刀设计

2.1 设计原理

螳螂作为昆虫界中人类已知最优秀的捕食者之一,其优异的捕食能力得益于它前足上极为锐利的锯齿状凸刺,通过其前足独特的锯齿排列方式和长短结构,螳螂甚至可以捕食体积和质量大于其本身很多倍的蛙类、爬行类和鸟类动物。螳螂这种优秀的捕食能力和它前腿节上的锯齿排列方式及长短分布结构密不可分,该结构方式对于开沟刀具仿生减阻降耗的设计有重要的理论指导意义。

通过 Matlab 对螳螂前腿节的照片进行二值化处理,得到螳螂前腿节的二值化黑白图像,如图 3 所示。

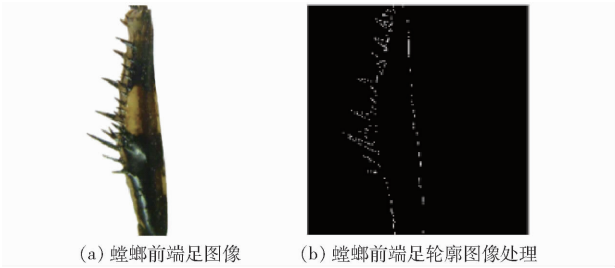


图 3 螳螂前端足图像

Fig. 3 Front foot images of mantis

通过 Bwperim 函数对二值黑白图像查找边缘,膨胀降噪开运算得到螳螂前腿节的轮廓图像,再使用 Ginput 函数处理得到图像上的边缘坐标值,结合国际开沟刀设计标准,为了更好的滑切效果和更长的工作寿命,本文选择将端足图像设计为内凹的锯

齿状开沟正切刃,提高锯齿状凹槽的宽度使其厚度在实际工作中更加合理,结合相似性原则,将螳螂前

端足的平面图中大锯齿尖端、齿根、足底、小锯齿尖端的顶点在二维坐标系中标注,如表 1 所示。

表 1 前端足各结构位置
Tab.1 Front foot structure position

			mm		
端点名称	X 轴坐标位置	Y 轴坐标位置	端点名称	X 轴坐标位置	Y 轴坐标位置
第一大锯齿凸起	364.42	523.73	第三凸起腿节底端	149.46	233.34
第一小锯齿凸起	239.97	508.65	第四大锯齿凸起	334.25	218.26
第一凸起底部	187.17	482.25	第四小锯齿凸起	247.51	203.17
第一凸起腿节底端	119.29	414.36	第四凸起底部	228.66	191.86
第二大锯齿凸起	353.11	429.45	第四凸起腿节底端	209.80	150.38
第二小锯齿凸起	217.34	421.91	第五小锯齿凸起	330.48	165.46
第二凸起底部	164.55	399.28	第五凸起底部	251.28	161.69
第二凸起腿节底端	157.00	342.71	第五凸起腿节底端	221.11	108.89
第三大锯齿凸起	338.02	327.63	第六小锯齿凸起	322.94	120.21
第三小锯齿凸起	221.11	316.31	第六凸起底部	266.37	97.58
第三凸起底部	187.17	289.91	第六凸起腿节底端	217.34	44.78

通过计算得到表格中前腿凹槽相对于整体的比例,其中大锯齿状凸起占全腿宽度比例平均值为 0.46,长宽比为 0.2;小锯齿状凸起占全腿宽度比例为 0.246,长宽比为 0.38。两者在前端足上分布为依次分布,以内凹相对于整个腿节宽度的比例做出开沟刀侧切刃上的锯齿状沟槽。得到大锯齿的凹槽深度为 19.8 cm,凹槽宽 3.8 cm;小锯齿状凹槽深度为 10.3 cm,凹槽宽为 3.6 cm。为了实际加工方便,取大凹槽长宽为 20 cm×4 cm,小凹槽长宽为 10 cm×3.5 cm。结合已有的开沟刀曲线优越的滑切性能和仿生部的减阻降耗能力,使其可以仿照螳螂前足的形式在开沟时提高开沟效率,降低阻力。

仿生开沟刀的结构主要由刀柄、正切刃、侧切刃、过渡刃组成,如图 4 所示,其结构参数如表 2 所示。仿生开沟刀分为左弯刀和右弯刀两种,两种刀间错对称安装在刀盘上。一个刀盘上安装两种开沟刀各 3 个。通过刀孔位置调整仿生开沟刀安装角。

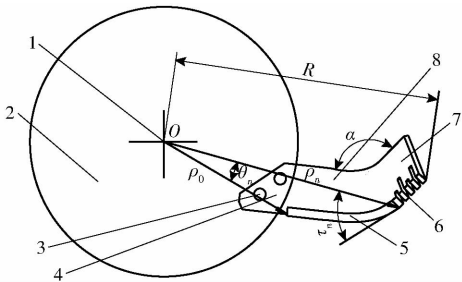


图 4 仿生开沟刀结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of trenching knife

1. 回转中心 2. 安装螺孔 3. 刀柄 4. 侧切刃 5. 正切刃 6. 正切部 7. 侧切部 8. 开沟刀盘

2.2 开沟刀侧刃曲线

为了保证开沟刀有较好的切土、入土效果、稳定

表 2 仿生开沟刀结构参数
Tab.2 Bionic trenching knife design parameters

参数	数值
回转半径 R/mm	300
起始极径 ρ_0/mm	192.5
终止极径 ρ_n/mm	280
终止滑切角 $\tau_n/(\text{°})$	60
回转极角 $\theta_n/(\text{°})$	44.6

的工作性能,在开沟刀工作时,侧切刃依据距离轴心线的远近依次入土。为了保证开沟刀侧切刃有锐利的切土性能,有利于将开沟时的土和杂物沿刀刃甩出,采用阿基米德等进螺线为开沟刀侧切刃曲线

$$\rho = \rho_0 + k\theta \tag{6}$$

式中 θ ——螺线上任意点的极角,rad
 k ——螺线上极角每增加 1 rad 极径的增量,mm/rad

螺线终点处的极径为

$$\rho_n = \rho_0 + k\theta_n \tag{7}$$

由于地表覆盖有秸秆,为了满足深埋的要求,在刀入土的瞬间应保证有侧刃工作,即开沟刀入土部分皆有刃,则螺线起点的极径 ρ_0 为

$$\rho_0 = \sqrt{R^2 + S^2 - 2S\sqrt{2Rh - h^2}} \tag{8}$$

计算得螺线起点处的极径为 192.5 mm,为了使侧刃的螺线可以和正切刃曲线圆滑过渡,螺线终点处的极径一般比刀具的回转半径小 10~20 mm,终点螺线极径 ρ_n 取 280 mm,故螺线终点极角为

$$\theta_n = \frac{\rho_n - \rho_0}{\rho_0} \tan \tau_n \tag{9}$$

计算得 θ_n 为 0.787 rad。为了不使刀片过长导致刀片强度过低,当回转半径为 300 mm 时,侧切刃

2.4 开沟刀所受阻力仿真分析

2.4.1 DEM 模型

仿生开沟刀在开沟过程中作用于土壤深度为 25 ~ 30 cm。在开沟过程中作业情况复杂、开沟阻力大,因此需要开沟刀具有良好的减阻降耗性能。利用仿生开沟刀和普通开沟刀进行离散元仿真分析,模拟仿生开沟刀在土壤中的运动过程,可以得到开沟过程中土壤颗粒的运动情况并进行土壤颗粒运动分析和开沟刀受力运动分析。将 SolidWorks 中建立好的仿生开沟刀模型导入 EDEM 中,并建立满足耕深条件的土壤颗粒模型(3×10^5 个),土壤颗粒间的基础模型选用 Hertz - Mindlin 粘结接触类型。为了保证仿真结果符合实际,本文选定仿生开沟刀片材料为 65Mn,土壤颗粒半径为 2 mm 的球体,土槽的尺寸为 0.7 m × 0.2 m × 0.4 m,仿真模型如图 6 所示。

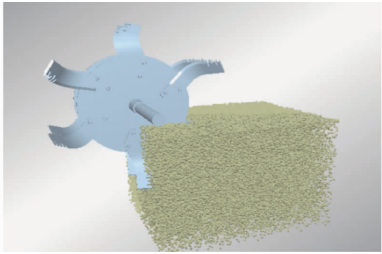


图 6 仿真模型
Fig. 6 Simulation model

2.4.2 仿真结果分析

仿真结果如图 7 所示,开沟刀开沟过程中所受阻力及所受阻力位置,从入土开沟时刻到出土结束时,可以画出一定的轨迹曲线,因此,在开沟过程某一时刻的开沟点位置上所受阻力的作用点位置,存在与开沟点位置相对应的轨迹曲线的一点上。开沟刀受力作用点轨迹和受力变化如图 8 所示,轨迹曲线 1、2、3、4 为开沟刀全部开沟阻力作用点轨迹,轨迹 4、6 为开沟刀尖端开沟轨迹曲线,轨迹曲线 1、5、4 为开沟刀末端开沟轨迹曲线, O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 为轨迹点 1、2、3、4 对应运动圆心, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 为开沟刀运动至轨迹曲线 1、2、3、4 时和对应回转中心的连线与回转中心轴的夹角, F_x 为开沟刀某点受力 F 的水平分量, F_y 为开沟刀某点受力 F 的竖直分量。图 8 表示了开沟刀在一次开沟过程中,开沟刀正切部和侧切部的开沟运动轨迹,开沟刀在开沟过程中所受阻力的竖直分力、水平分力的测定值趋势与作用轨迹、开沟所受阻力及其作用点位置的相互关系。通过仿真测定值可以求得开沟刀在整个开沟过程中所受总阻力的数值与趋势。

将仿生开沟刀和普通开沟刀以 300 r/min 的转速在上述仿真模型土壤中运动时,以入土瞬间为 0

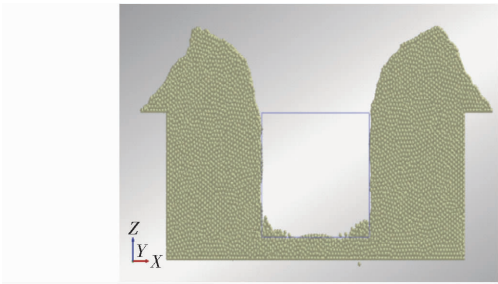


图 7 仿真效果
Fig. 7 Simulation effect

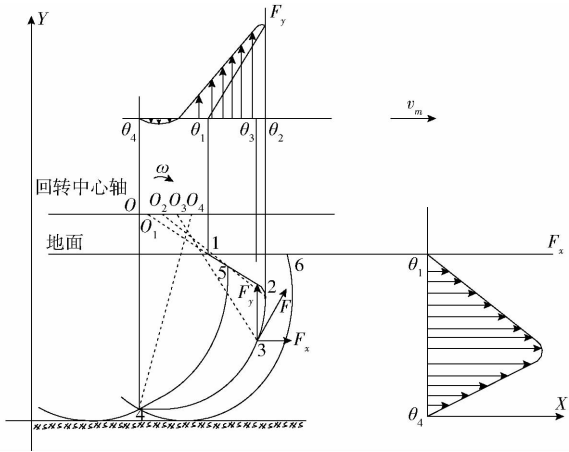


图 8 开沟刀受力作用点轨迹和受力变化
Fig. 8 Trajectory and force change of force acting point of trenching knife

时刻,出土瞬间为开沟结束时刻,将数据导入 Matlab 中进行数据分析,得到两刀具受力图如图 9 所示。

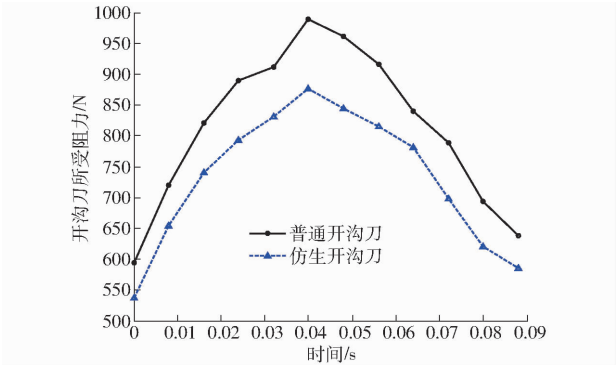


图 9 两种刀开沟阻力对比
Fig. 9 Comparison of two kinds of knife ditch resistance

由图 9 可知,在相同回转半径和角速度的条件下,从 0 s 开沟刀入土到 0.88 s 完成开沟作业。同样的作业条件下仿生开沟刀所受阻力均小于普通开沟刀,通过均值计算得到仿生开沟刀相对于普通开沟刀可减少阻力 9.19%。

2.5 土槽验证试验

土槽试验于 2017 年 9 月 23 日在沈阳农业大学农机实验室进行,首先对土槽内土壤环境进行调整,使其与实际工况中的土壤情况相近,主要使用 SM - 2 型高精度土壤水分测量仪、SC900 型土壤紧实度

测量仪对土壤的含水率和紧实度进行测量,使土槽内土壤在开沟深度 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 时土壤含水率为 23.2%、25.6%、27.8%,土壤紧实度为 241.5、981.1、1 168.4 kPa,与实际田间工况相近。土槽试验动力由 12 kW 的试验电动车提供,由于实际工作中刀具上所受阻力难以测量,故选择使用扭矩传感器测量开沟装置上刀具所受扭矩。

土槽试验主要为了验证所设计仿生开沟刀的减阻性能,由扭矩计算公式可知,当两种开沟刀在同样回转半径即同样力矩的情况下,开沟装置所受扭矩的比值即为两种开沟刀所受阻力的比值。在试验中试验电动车的前进速度为 1 m/s,刀轴转速 300 r/min,开沟深度为 30 cm,在工作过程中测试两种开沟刀所受扭矩的变化,土槽验证试验情况如图 10 所示。



图 10 土槽验证试验
Fig. 10 Soil tank verification test

试验结果表明,在同样土壤条件(近似实际工况)、前进速度、转速和开沟深度情况下,拖拉机在使用普通开沟刀的输出扭矩为 832.45 N·m,使用仿生开沟刀时的输出扭矩为 753.49 N·m,仿生开沟刀相对于普通开沟刀可降低阻力 9.48%。

3 田间试验与分析

3.1 田间工况

根据国家农业行业标准 NYT 500—2002 规定的秸秆深埋质量的试验方法和机械行业推荐标准 JB/T 8401.2—2007《旋耕联合作业机械 旋耕深松灭茬起垄机》,对秸秆深埋还田机的仿生开沟刀性能试验于 2017 年 10 月 21 日在辽宁省沈阳市辽中区朱家房镇白沟村中留有玉米根茬的垄作未耕地块进行测试,机具试验情况如图 11 所示。

以不同秸秆覆盖量、机具的开沟深度和机具的前进速度进行试验,检测的试验指标为深埋率和工作效率。试验主要仪器有水分测试仪、土壤紧实度测试仪、尺子、天平和数码相机等。

3.2 试验方法

深埋率是判定刀具工作性能的重要评价指标之一,本文统计的深埋率是测量工作后的土壤表层剩余秸秆质量和工作前地表秸秆总质量的比值,通过



图 11 田间试验
Fig. 11 Field experiment

3 点取平均值得出秸秆深埋率。机具工作效率是指在机具以开沟作业时的前进速度,从机具稳定工作开始计时,10 min 行进的距离和机具的工作幅宽以及秸秆深埋率的乘积换算得出机器的工作效率。

采用三因素五水平二次回归正交旋转组合优化试验的方法。选取机具前进速度 *A*、秸秆深埋深度 *B*、秸秆覆盖量 *C* 为试验因素(因素水平见表 3),以深埋率 y_1 、工作效率 y_2 为试验指标,一共进行 23 组试验(其中零水平试验 9 组,表中试验编号为 15 ~ 23),试验取值为 3 次试验的平均值。试验时,先将机具调整至正常稳定工作状态,后在不同因素水平的土地上进行试验,同因素水平下进行 3 次试验取平均值为试验数据,将试验数据录入 Design-Expert 8.0 中对试验数据进行回归分析,试验情况和结果如表 4 所示。

表 3 因素编码
Tab.3 Experiment factors and codes

编码	因素		
	机具前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	秸秆深埋 深度/cm	秸秆覆盖量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
1. 682	1. 90	30. 00	500. 00
1	1. 63	27. 97	459. 46
0	1. 23	25. 00	400. 00
- 1	0. 83	22. 03	340. 54
- 1. 682	0. 56	20. 00	300. 00

3.3 试验结果与分析

应用 Design-Expert 8.0 对试验结果进行统计分析,结合响应面法进行回归方程拟合度和显著性检验,建立关于秸秆深埋率和工作效率的回归模型,根据拟合后模型的响应面分析和各因素间的交互作用进行验证。

3.3.1 深埋率回归模型结果与显著性分析

深埋率回归模型与显著性方差结果如表 5 所示。在 0.05 的显著性水平下,对回归方程进行显著性和方差分析,分析结果可得回归方程模型 $F = 48.38 > F_{0.01}(9, 13) = 4.19, P < 0.000 1$,模型极显著,失拟项 $F = 1.96 < F_{0.01}(5, 8) = 6.63, P = 0.189 3$,说明拟合不足不显著,因此模型拟合合适,对于整个

表 4 试验结果
Tab.4 Test results

编号	试验因素			试验指标	
	$A/(m\cdot s^{-1})$	B/cm	$C/(kg\cdot m^{-2})$	$y_1/\%$	$y_2/(hm^2\cdot h^{-1})$
1	0.83	22.03	340.54	86.78	5.69
2	1.63	22.03	340.54	85.33	4.49
3	0.83	27.97	340.54	91.47	5.43
4	1.63	27.97	340.54	90.69	4.11
5	0.83	22.03	459.46	80.31	5.30
6	1.63	22.03	459.46	75.78	4.42
7	0.83	27.97	459.46	82.66	4.53
8	1.63	27.97	459.46	78.79	3.59
9	0.56	25.00	400.00	85.33	5.10
10	1.90	25.00	400.00	79.32	3.41
11	1.23	20.00	400.00	82.33	5.43
12	1.23	30.00	400.00	85.67	4.56
13	1.23	25.00	300.00	94.32	5.16
14	1.23	25.00	500.00	74.58	4.35
15	1.23	25.00	400.00	83.66	4.93
16	1.23	25.00	400.00	82.79	4.89
17	1.23	25.00	400.00	84.99	4.87
18	1.23	25.00	400.00	81.77	4.95
19	1.23	25.00	400.00	84.67	4.99
20	1.23	25.00	400.00	83.78	4.74
21	1.23	25.00	400.00	82.98	4.78
22	1.23	25.00	400.00	83.00	4.88
23	1.23	25.00	400.00	83.55	4.98

表 5 深埋率方差分析
Tab.5 Deep burial rate variance analysis

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	18.19	9	2.02	91.91	<0.000 1
A	31.49	1	31.49	23.88	0.000 3
B	32.38	1	32.38	24.55	0.000 3
C	358.06	1	358.06	271.49	<0.000 1
AB	0.22	1	0.22	0.17	0.688 9
AC	4.76	1	4.76	3.61	0.079 9
BC	2.75	1	2.75	2.08	0.172 4
A^2	1.68	1	1.68	1.27	0.279 6
B^2	1.13	1	1.13	0.86	0.370 7
C^2	2.89	1	2.89	2.19	0.162 9
残余项	17.15	13	1.32		
失拟项	9.44	5	1.89	1.96	0.189 3
误差	7.70	8	0.96		
总计	452.53	22	1.89		

二次回归分析得出对深埋率的影响由大到小为秸秆覆盖量、秸秆深埋深度、机具前进速度。机具前进速度和秸秆深埋深度的 F 值相近,说明两因素在本试验范围内对于深埋率的影响水平相近,同时都小于秸秆覆盖量。在任意两因素的交互作用中,每个交互作用的 P 值都大于 0.05,说明任意两因素的交互对于深埋率的影响都不显著,因此去掉 $P>0.05$ 的

不显著项,简化回归方程(x_1 为机具前进速度的编码值、 x_2 为秸秆深埋深度的编码值、 x_3 为秸秆覆盖量的编码值)为

$$y_1 = 83.46 - 1.52x_1 + 1.54x_2 - 5.12x_3 \quad (17)$$

3.3.2 工作效率回归模型结果与显著性分析

工作效率回归模型与显著性方差结果如表 6 所示,在 0.05 的显著性水平下,对机具工作效率的回归分析和方差分析表可知,回归方程模型 $F = 133.02 > F_{0.01}(9,13) = 4.19, P < 0.000\ 1$,回归极显著,失拟项 $F = 0.34 < F_{0.01}(5,8) = 6.63, P = 0.872\ 9$,说明拟合不足不显著,因此本模型拟合是合适的,对于整个二次回归分析得出对工作效率的影响由大到小为机具前进速度、秸秆深埋深度、秸秆覆盖量,秸秆覆盖量和秸秆深埋深度的 F 值相近,说明两因素在本试验范围内对于工作效率的影响水平相近,同时都小于机具前进速度。在任意两因素的交互作用中,机具前进速度和秸秆覆盖量的交互作用对工作效率的影响($P = 0.005\ 2 < 0.05$)以及秸秆深埋深度和秸秆覆盖量的交互作用影响($P = 0.000\ 5 < 0.05$)显著,因此去掉 $P > 0.05$ 的不显著项,简化回归方程为

$$y_2 = 4.89 - 0.53x_1 - 0.27x_2 - 0.24x_3 + 0.088x_1x_3 - 0.12x_2x_3 - 0.22x_1^2 + 0.045x_2^2 \quad (18)$$

表 6 工作效率方差分析
Tab.6 Work efficiency variance analysis

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	6.53	9	0.73	133.02	<0.000 1
A	3.78	1	3.78	692.26	<0.000 1
B	1	1	1	184.03	<0.000 1
C	0.77	1	0.77	141.07	<0.000 1
AB	4.05×10^{-3}	1	4.05×10^{-3}	0.74	0.404 6
AC	0.061	1	0.061	11.23	0.005 2
BC	0.12	1	0.12	21.11	0.000 5
A^2	0.74	1	0.74	136.1	<0.000 1
B^2	0.033	1	0.033	6.01	0.029 1
C^2	0.025	1	0.025	4.52	0.053 2
残差	0.071	13	5.46×10^{-3}		
失拟项	0.013	5	2.51×10^{-3}	0.34	0.872 9
误差	0.058	8	7.30×10^{-3}		
总计	6.6	22			

3.3.3 因素的响应面效应分析

由于各因素之间的交互作用对秸秆深埋率的影响不显著,则其相互作用的响应面没有意义,而各因素相互作用中对工作效率的影响结果如图 12 所示。由图 12a 可知,当机具前进速度为 1.23 m/s,秸秆覆盖量一定时,机具的工作效率随着秸秆深埋深度的增加而降低;当秸秆深埋深度一定时,机具的工作效

率随着秸秆覆盖量的增加而减少。由图 12b 可知,当秸秆深埋深度为 25 cm,机具前进速度一定时,机具的工作效率随着秸秆覆盖量的增加而减少;当秸秆覆盖量一定时,机具的工作效率随着机具的前进速度的增加而增加。

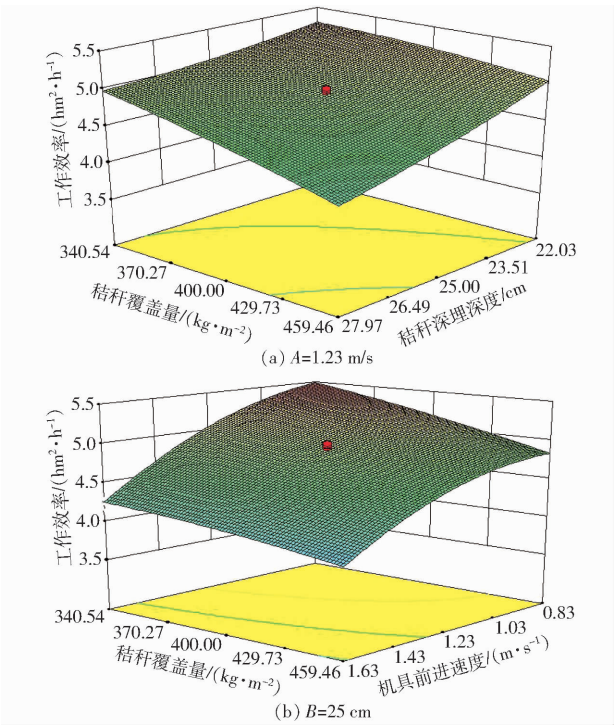


图 12 各因素交互作用对工作效率影响的响应曲面
Fig. 12 Response surfaces of interaction of various factors on work efficiency

3.4 参数优化

咨询专家后,知开沟装置秸秆深埋中,开沟装置的深埋率要求更高,故深埋率权重为 0.7、工作效率权重为 0.3 时,以机具工作效率和深埋率为响应值,利用软件 Design-Expert 8.0 中的优化求解当深埋率和工作效率均设定参数为 Maximize 时模型的最佳预测参数,并求解得到最佳的工作参数。当机具前

进速度为 1.63 m/s,开沟装置开沟深度为 27.97 cm,地表秸秆覆盖量为 340.54 kg/hm²时,秸秆深埋率为 90.491%,工作效率为 5.4 hm²/h。考虑到试验的操作性和机具的实际工作状况,对优化条件进行一定的调整为机具前进速度为 1.63 m/s,开沟装置开沟深度为 28 cm,地表秸秆覆盖量为 340 kg/hm²,并进行 3 次试验,随机选择测试区域求得秸秆深埋率分别为 90.1%、90.3%、89.8%,与预测值 90.491% 十分接近;工作效率为 5.36、5.38、5.376 hm²/h,与预测值 5.4 hm²/h 接近,两者求平均后再计算误差分别为 0.04% 和 0.05%,说明试验优化的结果和实际相符,响应面模型和试验优化具有可靠性和预测性。

4 结论

- (1) 利用 Matlab 软件对螳螂前端足的形态进行分析,得到仿生开沟刀的刃缘凹槽曲线参数中大凹槽长与宽为 20 cm×4 cm,小凹槽长与宽为 10 cm×3.5 cm,交错分布于开沟刀正切部,得到仿生开沟刀的优化结构参数。
- (2) 仿生开沟刀仿真试验和土槽试验表明,开沟刀利用侧切刃对土壤的滑切作用和仿生刃对土壤的砍切作用将土壤由表及里的切碎,并利用仿生正切刃的仿生凹槽达到降阻减耗的目的,与普通开沟刀相比,仿生开沟刀可降低阻力 9.48%。
- (3) 通过机具田间试验,在机具前进速度为 1.63 m/s,开沟装置开沟深度为 27.97 cm,地表秸秆覆盖量为 340.54 kg/hm²的情况下,开沟装置的秸秆深埋率为 90.491% 左右,工作效率为 5.4 hm²/h。开沟深度和深埋率达到了秸秆深埋还田技术要求,为气力式玉米秸秆深埋还田机改进设计提供理论参考和依据。

参 考 文 献

1 王胜楠,邹洪涛,张玉龙,等. 秸秆集中深还田两年后对土壤主要性状及玉米根系的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):68-78.
WANG Shengnan,ZOU Hongtao,ZHANG Yulong,et al. Effects of deeply and concentrated returned straw on soil main properties and corn root system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2015,33(3):68-78. (in Chinese)

2 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)

3 于琳浩,耿爱军,王明廷,等. 玉米秸秆还田现状与对策探析[J]. 农业装备与车辆工程,2015,53(11):4-6.
YU Linhao,GENG Aijun,WANG Mingting,et al. Study on present situation of maize straws returning and countermeasure[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2015,53(11):4-6. (in Chinese)

4 冷海霞. 玉米秸秆持水深埋抗旱技术研究[J]. 现代农业,2015(12):48.

5 郑佩,何进,李洪文,等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):61-71. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170806&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.006.

- ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61–71. (in Chinese)
- 6 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)
- 7 陈青春, 石勇, 丁启朔, 等. 正反转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 13–18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13–18. (in Chinese)
- 8 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 9 方会敏, 姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- 10 王庆杰, 刘正道, 何进, 等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 10–17.
WANG Qingjie, LIU Zhengdao, HE Jin, et al. Design and experiment of chopping-type maize straw returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 10–17. (in Chinese)
- 11 张秀梅. 高茬秸秆还田旋耕机工作机理与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
ZHANG Xiumei. Study on working mechanism and experimental of rotary tiller for high straw returning[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 12 田家治, 裴泽莲, 高占文, 等. 1LF-2 型秸秆深埋翻耕犁的设计[J]. 农业科技与装备, 2015(1): 15–16.
TIAN Jiazhi, PEI Zelian, GAO Zhanwen, et al. Design of type 1LF-2 straw burying tillage plow[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(1): 15–16. (in Chinese)
- 13 薄鸿明, 林静. 玉米秸秆还田机的设计与参数研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 99–103.
BO Hongming, LIN Jing. The design and simulation analysis of maize field straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 99–103. (in Chinese)
- 14 王奇. 水稻整秆深埋还田装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
WANG Qi. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 15 黄伟华, 严晓丽, 董学虎, 等. 1GYFH 型甘蔗叶粉碎混埋还田机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 140–144.
HUANG Weihua, YAN Xiaoli, DONG Xuehu, et al. Design and experiment on the 1GYFH type returning machine of grinding and mixed-buried sugarcane leaves[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 140–144. (in Chinese)
- 16 日力夏提·布都热西提, 尼加提·玉素甫, 买买提明·艾尼. 旋耕刀结构优化设计与动力稳定性分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 57–61.
RISHAT Abdirshit, NIJAT Yusup, MAMTIMIN Geni. Structural optimization and dynamic stability analysis of rotary blade[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 57–61. (in Chinese)
- 17 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(5): 1–3.
LIU Wuren, ZHENG Jinyu, LUO Yang, et al. Effects of structures of different tillage layer on growth and yield of maize[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2013, 38(5): 1–3. (in Chinese)
- 18 王立春, 马虹, 郑金玉. 东北春玉米耕地合理耕层构造研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 13–17.
WANG Lichun, MA Hong, ZHENG Jinyu. Research on rational plough layer construction of spring maize soil in northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 13–17. (in Chinese)
- 19 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. 土壤与作物, 2015(4): 145–150.
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu, LU Xinchun, et al. The soil cultivated layer in dryland and technical patterns in cultivating soil fertility[J]. Soil and Crop, 2015(4): 145–150. (in Chinese)
- 20 王磊, 陶少强, 夏强, 等. 秸秆还田对土壤氮素养分及微生物量氮动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 810–814.
WANG Lei, TAO Shaoqiang, XIA Qiang, et al. Effect of straw returning on the dynamic of nitrogen nutrient and soil microbial biomass nitrogen[J]. Chinese Journal of Soil science, 2012, 43(4): 810–814. (in Chinese)
- 21 毛罕平, 陈翠英. 秸秆粉碎掩埋复式作业机的试验研究[J]. 农业机械学报, 1996, 27(3): 42–46.
MAO Hanping, CHEN Cuiying. General design and test of straw chopper combined with burying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(3): 42–46. (in Chinese)
- 22 陈翠化. 带状旋耕灭茬组合机灭茬部分最佳参数的试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2009.
CHEN Cuihua. The optimal parameters study on stubble machine of strip stubble-cleaning and rotary tillage machinery[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009. (in Chinese)

conservation tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1-2):122-128.

29 TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water stable aggregates in soil[J]. Journal of Soil Science, 1982,33(2): 141-163.

30 王允青,郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(3):607-610.
WANG Yunqing, GUO Xisheng. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2008,16(3):607-610. (in Chinese)

31 BAKER C J, SAXTON K E, RITCHIE W R, et al. No-tillage seeding in conservation agriculture[M]. 2nd ed. Oxford, UK: CAB International/FAO, 2006.

32 KARAMI A, HOMAE M, AFZALINIA S, et al. Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physical-chemical properties[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012,148: 22-28.

33 张喜瑞,何进,李洪文,等. 免耕播种机驱动圆盘防堵单元体的设计与试验[J]. 农业工程学报,2009,25(9):117-121.
ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on the driving disc of anti-blocking unit for no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9):117-121. (in Chinese)

34 王汉羊,陈海涛,纪文义. 2BMFJ-3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(4):64-70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130412&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 04. 012.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Anti-blocking mechanism of type 2BMFJ-3 no-till precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):64-70. (in Chinese)

35 顾峰玮,胡志超,陈有庆,等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报,2016, 32(20):15-23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting” [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15-23. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 59 页)

23 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4):9-16.  
FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(4):9-16. (in Chinese)

24 文立阁. 灭茬刀辊仿生减阻研究[D]. 长春:吉林大学,2009.  
WEN Lige. Study on bionic and resistance-reduction of stubble crushing blade roller[D]. Changchun: Jilin University,2009. (in Chinese)

25 李常营. 留高茬式玉米收获机切割部件的仿生设计及其切割机理[D]. 长春:吉林大学,2014.  
LI Changying. Bionic blade of corn harvester for leaving high stubble and its cutting mechanism[D]. Changchun:Jilin University, 2014. (in Chinese)

26 汲文峰. 旋耕-碎茬仿生刀片[D]. 长春:吉林大学,2010.  
JI Wenfeng. Biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking[D]. Changchun:Jilin University,2010. (in Chinese)

27 郭俊,张庆怡, MUHAMMAD S M,等. 仿鼹鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(6):43-50.  
GUO Jun, ZHANG Qingyi, MUHAMMAD S M, et al. Design and experiment of bionic mole's toe arrangement serrated blade for soil-rototilling and straw-shattering[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(6): 43-50. (in Chinese)

28 王庆杰,牛琪,葛士林,等. 保护性耕作双翼对称旋切式浅松刀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):104-107. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s016&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s016&journal_id=jcsam). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. S0. 016.  
WANG Qingjie, NIU Qi, GE Shilin, et al. Design and experiment of double-vane symmetrical rotary blade for surface tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):104-107. (in Chinese)

29 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.

30 丁为民,彭嵩植. 旋耕刀正切刃设计方法的研究[J]. 农业机械学报,1995,26(4):56-61.  
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on design of sidelong edge of rotary blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1995,26(4): 56-61. (in Chinese)

31 贾洪雷,汲文峰,韩伟峰,等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):45-50.  
JIA Honglei, JI Wenfeng, HAN Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(7): 45-50. (in Chinese)

32 马廷玺,钟宝瑜. 旋耕刀齿正切面安装角的确定及计算机绘图分析[J]. 北京农业工程大学学报,1986(1):13-22.  
MA Tingxi, ZHONG Baoyu. The determination of the mounting angle of the front cutting surface of the rotary tiller blade and its computer graphic annlyses[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University,1986(1):13-22. (in Chinese)