

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016

水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验^{*}

王金武 王 奇 唐 汉 周文琪 多天宇 赵 艺
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对目前我国水稻秸秆还田机械普遍存在的耕作深度浅、秸秆还田深度不满足农艺要求、旋耕部件缠草严重等问题,运用旋耕理论和数值计算分析方法设计了水稻秸秆深埋整秆还田装置。根据实际情况对土壤颗粒进行假设,运用离散元法建立土壤颗粒力学模型,应用 EDEM 软件进行整秆还田仿真虚拟试验,仿真结果表明,耕深在 20 cm 时,土壤表层覆盖率为 93.87%。通过土槽台架试验得到:在作业速度为 1.25 km/h、刀辊转速为 237 r/min 时,耕深可达到 22 cm,地表以下 15~20 cm 翻埋的秸秆占秸秆总量的 80%,秸秆还田率为 91.63%,同时刀辊轴不缠草。试验结果表明,秸秆还田深度达到水整地环节的要求,秸秆还田率较高。通过虚拟仿真和台架试验相互验证,证明新型整秆还田装置一次作业可实现切土、碎土、埋草、压草及覆土的功能,满足农艺要求。

关键词: 水稻秸秆还田机 整秆还田装置 离散元法

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0112-06

Design and Experiment of Rice Straw Deep Buried and Whole Straw Returning Device

Wang Jinwu Wang Qi Tang Han Zhou Wenqi Duo Tianyu Zhao Yi
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: At present, some problems of rice straw returning machine still exist in China, such as shallow tillage depth, straw counters-field depth can not meet the agronomic requirements, and rotary parts are easy to winding straw, etc. A new kind of rice straw deep buried and whole straw returning device was designed by using the rotary tillage theory and numerical calculation analysis. With the hypothesis of soil particles based on the actual situation, the mechanical model of soil particles was established and the simulated virtual experiment of whole straw returning device was carried out by applying the discrete element method (EDEM). As a result, the coverage rate of topsoil reached 93.87% when the tilling depth was 20 cm. By the soil-bin bench tests, the following results were obtained: when the operation speed was 1.25 km/h and the speed of knife roller was 237 r/min, the tillage depth could reach 22 cm; straws buried below the surface in 15~20 cm accounted for about 80% of the total straw; the topsoil coverage rate was 91.63%; and the knife roller shaft would not wrap the straws. The test results showed that straw buried depth can meet the requirements of paddy field tillage link and the topsoil coverage rate was high. Through the mutual verification between virtual simulation and bench test, it is proved that the design of whole straw returning device could realize the functions of cutting soil, breaking soil, burying grass, pressing grass and covering soil, which meets the agricultural requirements well.

Key words: Rice straw returning machine Whole straw returning device Discrete element method

引言

现阶段我国已将农作物秸秆的综合利用作为实

现农业可持续发展的一项基本国策^[1]。秸秆还田技术因具有补充土壤养分、促进微生物活动、减少化肥使用量、改善农业生态环境等特点已成为我国主

收稿日期: 2015-01-30 修回日期: 2015-03-17
^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B04)
作者简介: 王金武,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com

要的秸秆处理方式之一^[2]。秸秆还田深度在大于15 cm时,可以明显提高土壤温度及蓄水性能^[3-4];若被还田的秸秆在作物根系生长层(表层以下0~10 cm^[5])的含量过高会产生一系列影响次年作物生长的问题。目前我国水稻秸秆还田的主要方式有翻压还田和覆盖还田,水稻秸秆整秆深埋还田是一种新型还田方式,与其他秸秆处理方式相比,具有耕深较大、还田性能好、次年泡田整株秸秆不会浮出水面而影响插秧作业及作物生长等优点^[6],近年来已引起学者的关注并开展研究。基于上述分析,研制将水稻整株秸秆埋入根系生长层以下的还田机具是非常必要的。

离散元法(Discrete element method, DEM)是一种分析与求解复杂离散系统动力学问题的新型数值方法^[7]。作为典型的离散物质,土壤的粘结和破碎表现出离散性的本质,因此离散元法可以作为分析土壤动态行为的新理论^[8-11]。近年来国内外学者开始运用此种方法解决土壤颗粒问题,但均停留于理论阶段。

本文运用旋耕理论、数值计算分析方法设计一种新型的水稻秸秆深埋整秆还田装置,并配置了整株秸秆还田试验台架。应用离散元软件 EDEM 进行覆土旋耕虚拟试验,仿真机具作业效果。通过土槽台架试验检验机具的实际工作性能,与虚拟仿真进行对比分析,验证理论方法与设计分析的合理性和可行性,为整机的研究提供参考。

1 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计

水稻秸秆深埋整秆还田装置由刀辊滚筒、刀盘和还田刀具组成。为解决刀轴缠草问题设计了大直径刀辊滚筒,综合考虑秸秆特性及滚筒直径与功耗之间关系,确定滚筒外径为240 mm;为减小作业阻力、防止还田刀具刀柄部分缠草以及便于通过调节刀具安装角而确定合理的滑切角,设计了刀盘结构^[12],其外径为310 mm、内径为240 mm。还田刀具是水稻秸秆深埋整秆还田装置中最关键的工作部件,对作业质量及功率消耗起着决定性作用,刀具固装在刀盘上,完成切土、碎土、埋草、压草和覆土等功能。

1.1 深埋整秆还田刀具设计

深埋整秆还田刀具由刀柄、侧切部、过渡部及正切部组成。侧切刃为正弦指数曲线和阿基米德螺线的组合,实现切土、推土功能;正切刃为特殊空间曲线,实现抛土、升土功能;过渡刃以三维空间光滑曲线的形式将两部分连接,以改善刀具综合作业质量。增加刀体宽度,减小刀辊上埋草刀数量,利用宽刀正切面对土壤的冲击和破碎作用降低功耗,获得较好

的作业质量。深埋整秆还田刀结构如图1所示。

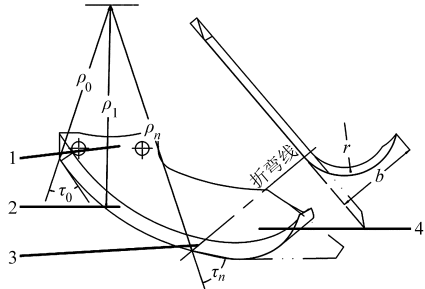


图1 深埋整秆还田刀结构示意图
Fig. 1 Structural sketch of deep buried and whole straw returning blade

1. 刀柄 2. 侧切部 3. 过渡部 4. 正切部

1.1.1 侧切刃设计

侧切刃前半部采用正弦指数曲线。此部分可有效防止刀柄部挂草,保证整刀在高留茬且多草的稻田里作业不缠草^[13]。

正弦指数曲线方程

$$\rho = \rho_0 (\sin \tau_0 / \sin (\tau_0 - K \theta))^{1/k} \tag{1}$$

式中 ρ_0 ——正弦指数曲线起点极径,mm
 τ_0 ——曲线起点的静态滑切角,(°)
 K ——曲线上静态滑切角递减比
 θ ——任意点极角,(°)
 k ——正弦指数曲线系数

还田刀具固装在刀盘上,侧切刃初始位置回转半径应大于120 mm,依据 GB/T 5669—2008《旋耕机械刀和刀座》的设计要求,确定 $\rho_0 = 150 \text{ mm}$, $\tau_0 = 52^\circ$ 。

侧切刃后半部采用阿基米德螺线。此部分的滑切角随着回转半径的增大逐渐增加,刀刃每转过单位角度,径向切土长度相同,使刀口切土负荷变化较为均匀。该部分可以增加耕深,减少摩擦阻力,防止刀具缠草。

阿基米德螺线方程

$$\rho = \rho_1 + a' \theta \tag{2}$$

$$\theta_n = \frac{\rho_n - \rho_1}{\rho_n} \tan \tau_n \tag{3}$$

$$a' = (\rho_n - \rho_0) / \theta_n \tag{4}$$

式中 ρ_1 ——阿基米德螺线起点极径,mm
 a' ——螺线极角增加单位弧度时极径的增量
 θ_n ——终点极角,rad
 ρ_n ——阿基米德螺线终点极径,mm
 τ_n ——阿基米德螺线终点处静态滑切角(常取 $50^\circ \sim 60^\circ$),(°)

根据农艺要求,确定整秆还田刀具的设计参数如下:耕深200 mm、刀具回转半径250 mm、切土节距80 mm。为使螺线能与正切刃光滑过渡, ρ_n 一般

比弯刀回转半径小 10 ~ 20 mm^[13], 本文取 20 mm。将设计参数代入以上公式中, 经计算, 取 $\rho_1 = 185\text{ mm}$, $\rho_n = 230\text{ mm}$, $\tau_n = 60^\circ$, $\theta_n = 0.34\text{ rad}$ 。

在刀具作业过程中, 必须考虑机具前进速度对滑切角变化的影响, 即动态滑切角。据文献[12]可知, 动态滑切角最佳范围是 35° ~ 55°。为保证还田装置的作业效果且减小切割阻力, 在设计过程中令其动态滑切角不断减小, 限制在 45° ~ 55°内变化。

1.1.2 正切刀及过渡刀设计

正切刀设计采用空间过渡曲线, 正切面为弧形曲面。正切刀曲线上各点滑切角逐渐增大, 对土堡有一定加速作用。为提高刀具的抛土性能, 同时减少耕耘阻力, 降低机具功耗, 设计正切刀弯折半径为 $r = 42\text{ mm}$, 刀具工作幅宽为 $b = 75\text{ mm}$ 。

过渡刀为一段空间曲线, 其将侧切刀曲线与正切刀曲线连接并圆滑过渡, 以提高刀具切土流畅性, 避免作业过程中产生应力集中, 影响刀具使用寿命。

深埋整秆还田刀在切削土壤过程中按照空间运动轨迹先由靠近刀柄部位的侧切刀切削土壤, 然后沿着侧切刀曲线向外逐渐切削土壤, 最后土壤及秸秆沿正切刀抛出^[6]。通过侧切刀避免切土过程中挂草、缠草, 同时增加耕深; 正切部切出沟底并将秸秆向外推移连根抛出土壤。在刀具整体作业过程中, 逐步增加刀具切土刃长及面积, 达到较为理想的还田效果。

1.2 深埋整秆还田装置刀具排列

深埋整秆还田装置的每个刀盘上交错安装左、右刀各两把, 作业时左、右刀依次入土。根据文献[6]及文献[13]知, 刀具按 4 条螺线规则排列, 可以降低还田装置作业功率, 保证耕深稳定、避免漏耕现象。主要参数为: 刀盘 6 个, 还田刀 24 把(左右各 12 把), 刀盘轴向间距 180 mm, 相邻刀片定位孔转角 15°。图 2 所示是深埋整秆还田装置的刀具排列展开图。

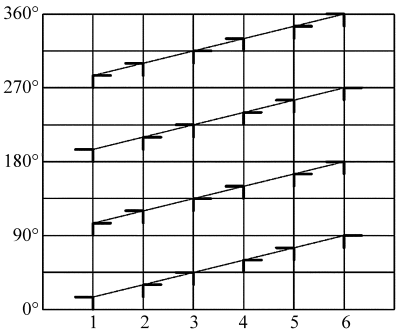


图 2 深埋整秆还田装置刀具排列
Fig. 2 Arrangement of deep buried and whole straw returning blade

1.3 深埋整秆还田工作原理

深埋整秆还田装置采用反转作业的方式, 还田刀具将土壤及整株秸秆通过刀辊上方向刀辊后方抛出。由于秸秆质量小, 导致其被抛起高度低且受空气阻力等影响其在空中运动时间短; 而切碎的土壤被刀具抛起的高度高, 受空气阻力等影响小使其在空中运动时间长^[6]。因此, 秸秆与土壤落入被切出的沟底存在时间差, 秸秆会先于土壤落入沟底, 且秸秆会被随后落下的土壤覆盖, 从而完成秸秆深埋还田作业。

2 深埋整秆还田虚拟试验台架设计

为分析深埋整秆还田装置的作业性能, 建立还田虚拟仿真模型, 进行虚拟仿真试验以验证其作业性能。在此基础上对虚拟试验台架进行整机配置, 为加工后续土槽验证试验所需试验台架做准备。本文运用离散元法建立土壤颗粒间力学模型, 并应用离散元软件 EDEM 进行还田作业虚拟仿真试验。

2.1 深埋整秆还田虚拟仿真模型建立

结合水稻秸秆深埋整秆还田装置, 应用 Pro/E 软件建立还田作业必要的仿真模型。为了将还田刀抛起的土壤顺利导流至刀辊后侧, 采用与刀辊滚筒同轴的凸弧形罩壳; 根据结构尺寸, 设计合理的侧挡板。在仿真过程中调节罩壳与挡板的参数以达到最佳工作性能。仿真模型如图 3 所示。

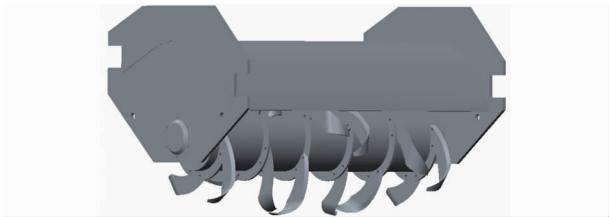


图 3 虚拟仿真模型
Fig. 3 Virtual simulation model

2.2 土壤颗粒离散元模型建立

深埋整秆还田装置旋耕切土作业质量与土壤物理性质有着密切关系。土壤颗粒间结构关系十分复杂, 建立合理的土壤颗粒模型, 能够真实地反映还田试验过程中土壤的运动趋势。

以东北地区农业耕作土壤为研究对象。结合实际情况, 运用土壤物理学及力学理论, 做如下假设: ①土壤颗粒主要为常规矿质土壤, 忽略其他土质影响。②土壤粒径在 0.5 ~ 5 mm 之间, 其粒径大小呈正态分布^[14]。③土壤颗粒形状简化为球状、杆柱状、鳞片状、团粒状、棱柱状、圆盘状、团块状、棱块状等 8 种^[15], 颗粒形状呈随机分布。④建立土壤接触非线性接触模型, 简化土壤颗粒间的主要作用形式

为粘结、碰撞、内聚及滑移4种^[14]。

运用离散元法将土壤颗粒间、颗粒与边界间的作用方式进行简化,分析工作部件在作业过程中对土壤颗粒动态行为的影响。结合 EDEM 软件中颗粒作用模型简化出土壤颗粒力学模型如下:①土壤颗粒中因毛细水管形成的不连续液桥产生粘性力简化为湿颗粒粘性力 JKR 接触模型^[16]。②土壤颗粒之间相对滑移、滚动产生的接触力、摩擦力简化为 Hertz-Mindlin with Rolling Friction 滚动摩擦接触模型。③土壤颗粒相互碰撞产生的能量损失简化为机械阻尼中的粘性阻尼。

2.3 EDEM 虚拟仿真试验

应用离散元软件 EDEM 对仿真模型进行虚拟仿真试验。

(1)前处理(Creator)设定

将建立的仿真模型导入 EDEM 中进行参数定义。设定模型材料为 45 号钢;根据实际田间作业情况,设定深埋整秆还田装置反旋作业,前进速度为 0.35 m/s,转速为 237 r/min,耕深为 20 cm;设定颗粒力学关系模型为:JKR 接触模型、Hertz-Mindlin (no-slip) 接触模型、Hertz-Mindlin with Rolling Friction 滚动摩擦接触模型;以实际土槽试验台为基准,建立虚拟土槽(长 5 m,宽 1.5 m)。

根据前期 8 种土壤颗粒形状及大小分布,在 EDEM 中建立土壤颗粒固体系统的参数化模型,如图 4 所示。通过查阅相关文献^[17],土壤颗粒泊松比为 0.25~0.42,平均容重为 2 100~2 500 kg/m³,土粒密度(土壤固相密度)为 2 400~2 800 kg/m³,土壤孔隙度为 30%~37%。

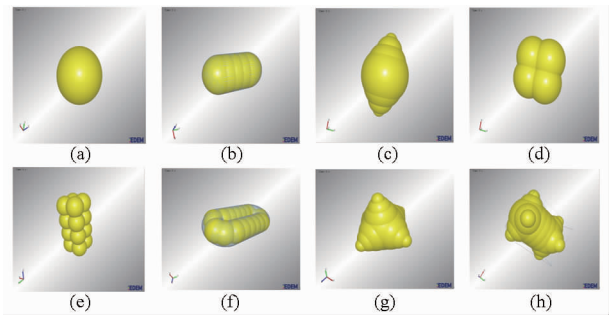


图4 8种EDEM土壤基本颗粒模型

Fig.4 EDEM model of eight basic soil particles

(a) 球状 (b) 杆柱状 (c) 鳞片状 (d) 团粒状
(e) 棱柱状 (f) 圆盘状 (g) 团块状 (h) 棱块状

(2)求解器(Simulator)设定

在保证仿真连续性的前提下,设定固定时间步长为 4.2×10^{-6} s,为 Rayleigh 时间步长的 5%,总时间为 10 s,网格单元尺寸为 2 mm,为最小颗粒半径的 2 倍。仿真过程如图 5 所示,粉色颗粒代表旋

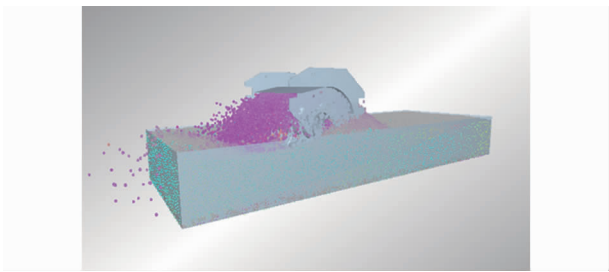


图5 EDEM覆土旋耕虚拟仿真过程

Fig.5 EDEM dynamic simulation of stubble-bury bent blade during working process

耕翻埋的土壤。

2.4 EDEM 虚拟仿真结果分析

根据离散元 EDEM 软件模拟土壤颗粒的特点,以旋耕作业国家标准为衡量指标,选取平整度及覆土率为虚拟试验分析对象。

(1)土壤平整度

利用 EDEM 软件的网格划分功能(Grid Bin Group 模块)对虚拟试验中的土槽进行区域划分,设定网格标尺为 15 mm;据 NY/T 499—2002《旋耕机作业质量》要求,待机具运作稳定后沿前进方向等距选取 4 个土槽横截面(如图 6 所示),并对各个区域的土壤耕作变化进行分析。

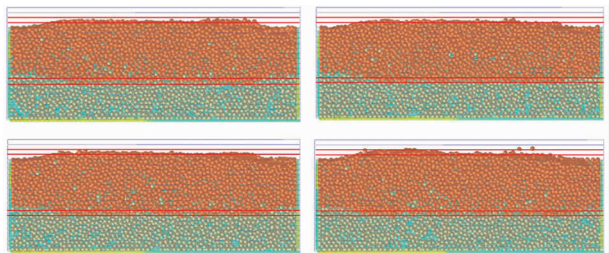


图6 虚拟旋耕作业平整度截面图

Fig.6 Virtual rotary tillage roughness section

由图 6 分析可以得出,经试验机具虚拟仿真作业后土壤表层比较平整,土壤表层轮廓线始终在一个网格单元内(图中红色标尺表示)即地表平整度小于 15 mm;被旋耕土壤的底层与未耕土壤间界限分明且较为平整,两部分土壤的界限轮廓线始终在一个网格单元内,即沟底不平度小于 15 mm。经上述分析,该试验机具作业后土壤平整度均满足行业标准要求且能够获得较高的土壤平整度。

(2)覆土率

根据旋耕覆土标准要求,将田间作业中秸秆、杂草深埋于地表 15 cm 以下以保证农艺耕作要求。运用 EDEM 软件的选择组集模块(Selection)功能进行土壤颗粒跟踪。分析作业后地表以下 0~10 cm 范围内土壤颗粒的纵向位移分布,具体位移分析如图 7 所示。

图 7 中,以土壤表层为临界标准面,x 轴表示在

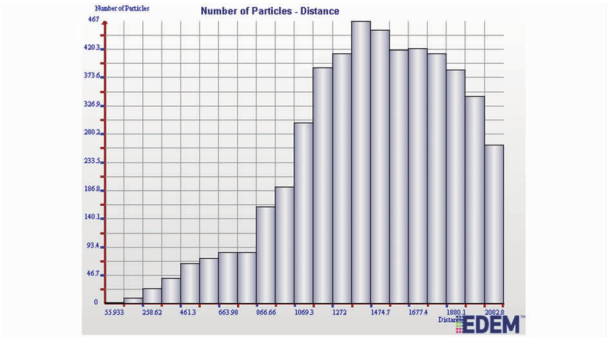


图 7 虚拟旋耕作业覆土率分析图

Fig. 7 Virtual rotary operation covering rate analysis chart

旋耕作业后土壤深度数值分布, y 轴表示标记区域内跟踪颗粒的数量,图 7 实质即为标记区域土粒旋耕入土层深度的数量分布。由图可得,经过深埋整秆还田仿真模型旋耕作业后,跟踪的颗粒大部分被旋入 10 ~ 20 cm 土壤中,最大深度达到 21 cm,且表层土壤的覆盖率达 93.87%。这表示此仿真模型具有较好的土壤翻埋效果,标记区域的土壤及长在地上的秸秆会被深层土壤(地表深度 10 cm 以下)所覆盖。

2.5 试验台架虚拟设计

结合设计的虚拟仿真模型,对虚拟试验台架进行整机配置,为加工后续土槽试验所需试验台架做准备。水稻秸秆整秆还田试验台架在虚拟仿真模型的基础上配置了机架总成、侧边减速器、挡草栅、限深滑板等关键部件。该试验台架通过三点悬挂架偏置挂接于土槽试验车上,土槽试验车将动力经由万向联轴器传至侧边减速器,再由侧边减速器带动深埋整秆还田装置进行反旋转耕完成水稻秸秆整秆深埋还田作业。该试验台架的主要参数为:作业幅宽 1 m、罩壳与旋耕回转半径间隙 70 mm、变速箱减速比 2.28、配套动力 30 kW,试验台架如图 8 所示。

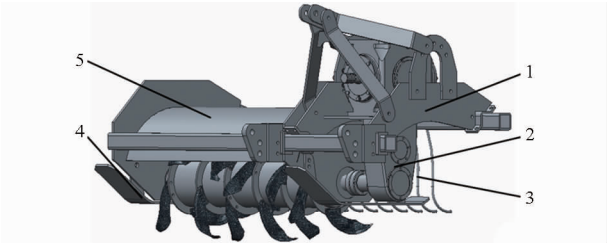


图 8 试验台架三维模型

Fig. 8 3D model of test equipment

1. 机架总成 2. 减速器 3. 挡草栅 4. 限深滑板 5. 虚拟仿真模型

3 土槽试验与分析

3.1 试验条件

试验地点为黑龙江省农业机械研究院的土槽试验室。秸秆还田试验机具的验证试验台包括 TCC—

Ⅲ型计算机监控及辅助测试土槽试验车、土槽、试验台架以及数据测试系统。

土槽内的土壤为黑龙江地区典型的黑壤土,试验单元区域面积为 2 m × 1 m,秸秆采用秋季收割的水稻秸秆。土壤及秸秆的处理情况:土壤含水率 30%;土壤坚实度 900 kPa;水稻行距 30 cm;水稻株距 15 cm。

作业过程中,调节土槽车变频器,控制调速电动机输出转速,使刀辊转速达到试验要求,同时保持预定的前进速度匀速作业,完成单个试验单元的测试。进行多组试验以检验秸秆还田试验机具的作业效果。

3.2 试验结果及分析

机具作业后对试验地块进行测定。试验台架作业前后效果对比如图 9 所示;被翻埋的秸秆在地表到沟底的垂直断面分布情况如图 10 所示。测量结果如表 1 所示。

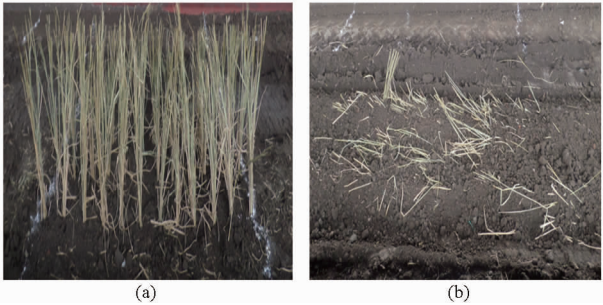


图 9 作业前后效果对比

Fig. 9 Comparison of tilled field and untilled field

(a) 作业前 (b) 作业后



图 10 作业后埋草深度

Fig. 10 Grass burying depth after operation

表 1 机具作业检测结果

Tab.1 Inspection and measurement results of working performance

检验项目	数值
作业速度/(km·h ⁻¹)	1.25
刀辊轴转速/(r·min ⁻¹)	237
作业幅宽/m	1.0
耕深/cm	22
秸秆还田率/%	91.63
耕后地表平整度/cm	1.2

由试验结果可知:深埋整秆还田试验机的耕深为20~23 cm,经测量在地表到沟底的整秆还田垂直断面内距地表15~20 cm内翻埋的秸秆占秸秆总量的80%左右,秸秆还田率为91.63%,刀辊轴几乎不缠草,秸秆整株还田质量良好,各项技术指标均能满足农艺要求。所设计的深埋整秆还田刀对增加耕深及秸秆还田深度,改善作业过程中刀轴及还田刀具缠草问题的效果明显。

将土槽验证试验结果与虚拟EDEM仿真试验分析结果进行比较,可以得出虚拟仿真结果与试验测试结果基本一致,土壤运动趋势基本相同。其中存在的误差如:耕深误差小于2 cm,覆土率误差为2.24%,耕后平整度误差小于0.3 cm,主要原因是:EDEM仿真环境过于理想,土壤颗粒模拟情况基本满足但仍有一定差别。但以上误差都在误差范围内,表明上述理论仿真及设计的合理性和可行性。

4 结论

(1) 运用旋耕理论、数值计算分析方法设计了一种深埋整秆还田装置,一次作业即可完成切土、碎土、埋草、压草、覆盖等功能。

(2) 采用虚拟样机理论,对土壤物理性质进行假设,建立土壤颗粒模型;应用离散元EDEM软件进行覆土旋耕虚拟试验,用以验证还田装置设计的合理性。与土槽台架试验结果进行比较,结果证明虚拟仿真结果与实际试验数据及土壤运动趋势均基本一致。证明理论仿真及设计的合理性和可行性。

(3) 设计了深埋整秆还田试验台架,进行了土槽验证试验,试验结果表明其作业效果良好,各项指标均满足农艺要求。在作业速度为1.25 km/h、刀辊转速为237 r/min时,耕深为22 cm、地表以下15~20 cm内翻埋的秸秆占秸秆总量的80%,秸秆还田率为91.63%,同时刀辊轴不缠草。

参 考 文 献

- 1 农业部. 全国农业机械化发展第十二个五年规划(2011—2015年)[R]. 北京: 中国农业部, 2011.
- 2 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43-48.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenyong. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43-48. (in Chinese)
- 3 常晓慧, 孔德刚, 井上光弘, 等. 秸秆还田方式对春播期土壤温度的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(8): 117-120.
Chang Xiaohui, Kong Degang, Inoue Mitsuhiro, et al. Effect of different straw returning methods on soil temperature in spring sowing period[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(8): 117-120. (in Chinese)
- 4 张帅, 孔德刚, 常晓慧, 等. 秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6): 127-129.
Zhang Shuai, Kong Degang, Chang Xiaohui, et al. Effect of straw deep application on soil water storage capacity[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(6): 127-129. (in Chinese)
- 5 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的分布及其与产量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2003, 24(3): 1-4.
Cai Kunzheng, Luo Shiming, Duan Shunshan. The relationship between spatial distribution of rice root system and yield[J]. Journal of South China Agricultural University, 2003, 24(3): 1-4. (in Chinese)
- 6 王金武, 尹大庆, 韩永俊, 等. 水稻整株秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 54-56.
Wang Jinwu, Yin Daqing, Han Yongjun, et al. Design and experiment of whole rice straw returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 54-56. (in Chinese)
- 7 张辉, 张永震. 颗粒力学仿真软件EDEM 简要介绍[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2008(12): 48-49.
- 8 Carrillo A R, West J E, Horner D A, et al. Interactive large scale soil modeling using distributed high performance computing environments[J]. The International Journal of High Performance Computing Applications, 1999, 13(1): 33-48.
- 9 Tanaka H, Inooku K, Sumikawa O, et al. Simulation of soil behavior at subsoiling by the distinct element method[C] // Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, 2001: 194-200.
- 10 Momozu M, Oida A, Yamazaki M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2003, 39(4): 207-220.
- 11 李建桥, 黄晗, 王颖, 等. 松软地面机器系统研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 306-320.
Li Jianqiao, Huang Han, Wang Ying, et al. Development on research of soft-terrain machine systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 306-320. (in Chinese)
- 12 赵铁军, 王金武. 水稻秸秆整株还田埋草弯刀滑切角与安装角分析[J]. 农机化研究, 2007(11): 58-60.
Zhao Tiejun, Wang Jinwu. Analysis and research of grass removing angle and setting angle of straw-mulching bent blade of straw-returned-native-field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(11): 58-60. (in Chinese)
- 13 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 294-299.
- 14 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 15 王功明, 郭新宇, 赵春江. 基于粒子系统的土壤可视化仿真研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 152-158.
Wang Gongming, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang. Soil visual simulation study based on particle system [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 152-158. (in Chinese)
- 16 张锐, 李建桥, 周长海, 等. 推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 13-19.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Zhou Changhai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozing plates with different surface configurations by discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 13-19. (in Chinese)
- 17 于建群, 钱立彬, 于文静, 等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 53-57.
Yu Jianqun, Qian Libin, Yu Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53-57. (in Chinese)