

秸秆深埋还田开沟灭茬机设计与试验

王瑞丽¹, 杨 鹏¹, Rabiou Falalu Jahun^{1,2}, 窦 森^{3*}

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110161; 2. Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Bayero University, Kano 999062; 3. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要: 秸秆还田是农作物秸秆综合利用最为直接的形式, 深埋还田能打破犁底层、培肥地力, 并提高土壤抗旱保墒能力。在秸秆深埋还田时, 由于作物根茬未粉碎, 深开沟的同时会出现大块土垡。秸秆深埋后还需对根茬和土垡进行二次粉碎, 增加了作业成本。为满足秸秆深埋还田开沟灭茬碎土的需求, 设计研制了一种集开深沟、碎土、灭茬等多道工序的用于秸秆深埋还田的开沟灭茬机。以导向铲入土深度、灭茬刀转速、灭茬深度为试验因素, 机器的作业阻力和灭茬碎土率为试验指标, 进行了三因素三水平正交试验。结果表明导向铲入土深度和灭茬深度对作业阻力有极显著影响, 灭茬刀转速对灭茬碎土率有极显著影响。在开沟深度为 35 cm 时, 导向铲入土深度、灭茬刀转速和灭茬深度分别为 100 mm、340 r/min 和 60 mm 时, 开沟灭茬机的作业性能最好, 作业阻力为 21.6 kN、灭茬碎土率为 96.3%、开沟深度稳定性为 92.4%。试验表明该机具有很好的开沟、灭茬、碎土效果, 该研究为秸秆深埋还田机具的研制和配备提供参考。

关键词: 机械化; 农作物; 设计; 深埋还田; 开沟; 灭茬; 碎土

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.006

中图分类号: S222.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-05-0040-08

王瑞丽, 杨 鹏, Rabiou Falalu Jahun, 窦 森. 秸秆深埋还田开沟灭茬机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 40—47. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.006 http://www.tcsae.org

Wang Ruili, Yang Peng, Rabiou Falalu Jahun, Dou Sen. Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(5): 40—47. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.006 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国的秸秆利用率低, 玉米收割后, 大部分秸秆被就地燃烧, 造成环境污染和资源浪费^[1-5]。加快推进农作物秸秆资源综合利用是中国一项亟待解决的问题, 秸秆机械化还田是秸秆资源综合利用的最直接形式。“秸秆深埋还田”不同于传统意义上的秸秆还田, 创新之处是“深”, 将秸秆埋入 20 cm 以下土层, 能解决露天焚烧问题, 也不影响作物播种^[6-8]。

开沟机开沟后、秸秆混肥还田机将秸秆和肥料施入 20~40 cm 土层, 然后覆土起垄机进行覆土起垄作业。秸秆深埋还田可以打破犁底层, 实现间隔深松功能^[9], 同时 20~40 cm 土层有机质亏缺程度高^[8-10], 秸秆深埋后在土壤深部分解可改善土壤结构, 增加土壤孔隙度, 形成更多的腐殖质^[11-15], 实现土壤固碳和二氧化碳减排, 促进土壤有机质积累、增强蓄水保墒能力^[16-19]。秸秆深埋还田将表土、秸秆、肥料集中到一个条带, 肥力效果发挥

更好。解决了铧式犁翻埋还田带来的播种机播种时秸秆挂机和种地“漏风”的问题, 最终可以同时解决目前耕层变薄、犁底层变浅变厚变硬、有机质下降的问题^[20-23]。秸秆深埋还田是环境保护与土壤培肥的统一。打破犁底层、培肥亚表层、增厚耕作层、提升有机质, 是化肥减施增效、粮食环境双安全的土壤学基础。

现阶段秸秆深埋还田作业由开沟机、秸秆混肥还田机、覆土起垄机三部机器配合完成^[24-25]。由开沟机进行开沟, 混肥还田机将秸秆粉碎混肥后排入开好的深沟内, 最后覆土起垄机进行覆土起垄作业。目前用于秸秆深埋还田的开沟机没有灭茬功能, 由于根茬的存在, 开沟时会掀起较大的垡块, 严重地影响深层还田的效果。本文研制了一种应用于秸秆深埋还田的开沟灭茬机, 该机能在秸秆还田开沟作业的同时完成灭茬碎土和土壤深松, 并对其作业阻力和灭茬碎土效果进行了试验研究, 在达到灭茬碎土标准的情况下减小作业阻力, 旨在进一步改进开沟机的作业性能, 为研发其他机型秸秆深埋还田开沟机提供参考。

1 设计要求与整机结构

1.1 设计要求

根据农艺要求和工作条件提出以下要求: 1) 能够稳定开沟, 开沟深度不低于 30 cm, 开沟宽度在 50~80 cm 之间; 2) 灭茬碎土率在 65%以上; 3) 机架与关键部件有足够的强度; 4) 整机的工作幅宽为 2.6 m (2 条大垄),

收稿日期: 2016-06-19 修订日期: 2016-12-30

基金项目: 吉林省高等学校秸秆综合利用高端科技创新平台(吉高平台字(2014)C-1); 吉林省重点科技攻关项目(20130206018NY)

作者简介: 王瑞丽, 女, 副教授, 主要从事农业机械化及智能化装备研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110161。Email: wangruili@syau.edu.cn

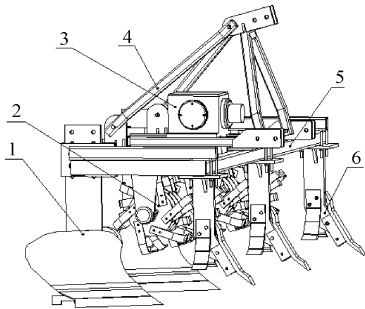
*通信作者: 窦 森, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤有机质和秸秆还田研究。长春 吉林农业大学资源与环境学院, 130118。

Email: dousen1959@126.com

同时开两个秸秆深埋沟；5) 开沟灭茬机与拖拉机悬挂联接，灭茬动力由拖拉机动力输出轴提供。

1.2 整机结构与工作原理

根据开沟灭茬机的设计要求，在开沟的同时进行灭茬碎土作业。机器总体结构如图 1 所示，主要由开沟犁 1、灭茬部件 2、变速箱 3、悬挂架 4、机架 5、导向装置 6 等组成。工作时，开沟灭茬机与拖拉机悬挂联接，拖拉机将开沟灭茬机落下，使导向铲、开沟犁、灭茬部件依次入土，开沟灭茬机随着拖拉机行走，导向装置（导向铲和导向翼）平衡土壤阻力，保证开沟作业时机器直线前进，并疏松土壤。拖拉机后动力输出轴的动力经变速箱变速后，传递给灭茬盘轴，由灭茬盘轴带动灭茬刀进行灭茬作业，最后再由开沟犁进行开沟作业。



1.开沟犁 2.灭茬部件 3.变速箱 4.悬挂架 5.机架 6.导向装置
1.Furrowing plow 2.Stubble breaking unit 3.Gearbox 4.Suspension bracket 5.Frame 6.Guide device

图 1 秸秆深埋还田开沟灭茬机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw

秸秆深埋还田开沟灭茬机技术参数如表 1 所示。

表 1 秸秆深埋还田开沟灭茬机主要结构参数

Table 1 Parameters of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw

参数 Parameter	数值 Value
外形尺寸 Dimensions/(mm×mm×mm)	1 140×2 820×1 100
工作幅宽 Working width/mm	2 600
行数 Number of rows	2
行距 Row space/cm	130
机器质量 Machine weight/kg	835
沟底宽 Ditch bottom-width/cm	28~33
沟面宽 Ditch top-width/cm	40~45
开沟深度 Plough depth/mm	300~350
旋耕深度 Rotary tilling depth/mm	60~100
配套动力 Matched power/kW	≥80

1.3 配套动力的计算

机组行驶过程所消耗的功率，可近似认为是拖拉机车轮克服摩擦阻力和拖拉机克服牵引阻力所消耗的功率与灭茬碎土装置工作时所消耗的功率之和，机器零件之间磨损所损耗的功率远小于上述功率消耗，故忽略不计。设拖拉机行进过程中滚动摩擦阻力为 f ，牵引阻力为 T ，整机前进速度为 v_m ，则所求功率为：

$$P_1 = (T + f) / v_m \tag{1}$$

$$T=KBH \tag{2}$$

$$f=uG_s \tag{3}$$

式中 P_1 为拖拉机克服牵引阻力所消耗的功率，kW； f 为滚动摩擦阻力，N； T 为牵引阻力，N； v_m 为机组工作时前进速度，m/s； B 为开沟工作幅宽，cm； K 为土壤比阻，N/cm²； H 为开沟深度，cm； u 为拖拉机轮胎与土表的滚动摩擦系数； G_s 为机组的重力，N。

根据所研究的机器参数范围和相关资料对各个参数进行取值。选取 $u=0.10$ ， $K=6.0$ N/cm²， $B_1=260$ cm， $h=35$ cm， $v_m=1.2$ m/s。以 Lovol M1204-D 型拖拉机(标功率为 88.2 kW)的质量参数为例近似计算 G_s 的值，机组的总质量约为 4 750 kg，即拖拉机和秸秆混肥还田机的重力为 $G_s=4\ 655$ N。将以上各值带入式（1）、式（2）、式（3），算得 $P_1=66.08$ kW。

灭茬碎土装置的功率消耗由拖拉机的动力输出轴提供，其功率 P_2 为

$$P_2=k_rLh v_m \tag{4}$$

式中 P_2 为灭茬碎土装置工作时所消耗的功率，kW； k_r 为旋耕土壤比阻，kg/cm²，取值范围为 1.2~1.6，与耕深有关，耕深大选大值； L 为灭茬碎土作业幅宽，cm； h 为旋耕深度，cm。

选取旋耕土壤比阻 $k_r=1.2$ ； $L=100$ cm（因为灭茬部件由 4 个刀盘组组成，每个刀盘组的工作幅宽为 25 cm）；机组工作时前进速度 $v_m=1.2$ m/s；工作深度 $h_1=8$ cm。将各值带入式（4），得 $P_2=11.52$ kW。

综上所述，本文设计的秸秆深埋还田开沟灭茬机所需总功率 $P=P_1+P_2=77.6$ kW，为保证开沟灭茬工作顺利进行，选用了动力为 88.2 kW 的拖拉机。

2 主要部件设计和分析

2.1 灭茬部件

灭茬部件（图 2）对玉米根茬进行粉碎，并进行表层碎土。其旋转速度、入土深度、灭茬刀排列方式及刀片数量都会对开沟灭茬机的灭茬碎土性能有影响。吴子岳等研究了非等长刀切碎模型^[26-27]，实现了上层多切、下层少切，灭茬效果好，因此本设计采用内外侧不同长度的切刀对残茬进行切削粉碎，由于内侧灭茬半径小于外侧，因此内外侧灭茬刀数不同。

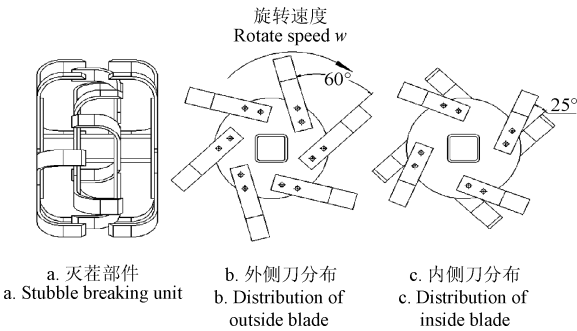


图 2 灭茬部件结构示意图

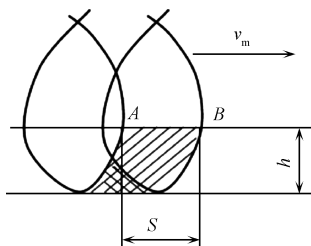
Fig.2 Structure diagram of stubble breaking unit

灭茬部件由灭茬盘轴套、外灭茬刀、内灭茬刀、内灭茬盘、外灭茬盘组成,灭茬盘轴套材料选用长×宽×高为 80 mm×80 mm×5 mm 的方管,灭茬盘由 5 mm 厚钢板制成,外灭茬刀刀柄长 250 mm,内灭茬刀刀柄长 200 mm。灭茬刀辊正转,外侧刀盘各安装 6 把灭茬刀,径向夹角为 60°,外侧灭茬刀组为对称的排列方式;内侧刀盘各安装 4 把灭茬刀,径向夹角为 90°,内侧刀组采用错位对称的排列方式,错位夹角为 25°。刀盘间距为 80 mm。灭茬刀采用固定刀形式,可以保证灭茬刀在旋转的过程中对根茬的切割率。灭茬刀与刀盘螺纹连接,方便拆卸与更换。

切土节距对开沟机的碎土程度有很大的影响,切土节距过大碎土效果较差,安装在同一回转平面内的刀片在转过相应安装角时间内机组所前进的距离定义为机组切土节距(图 3),则

$$S = \frac{60 \cdot v_m}{Z \cdot n} \quad (5)$$

式中 S 为切土节距, m; Z 为同一回转平面内的刀片个数; n 为刀轴转速, r/min。一般的黏重土壤和杂草地的切土节距范围为 4~6 cm。将参数 $v_m=1$ m/s, $Z_1(\text{内侧})=4$, $n=260\sim340$ r/min 代入式(5)得出: $S=5\sim7$ cm, 一般情况下切土节距 S 越小,灭茬碎土效果越好,故增加外部刀盘来调节切土节距,使其满足作业要求。



注: 曲线为刀片端点运动轨迹, v_m 为前进速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; A 、 B 为刀片入土点; h 为旋耕深度, cm; S 为切土节距, m。

Note: Curve is moving track of blade. v_m is forward speed, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; A and B are points of blade into the soil; h is rotary tilling depth, cm; S is soil cutting pitch, m.

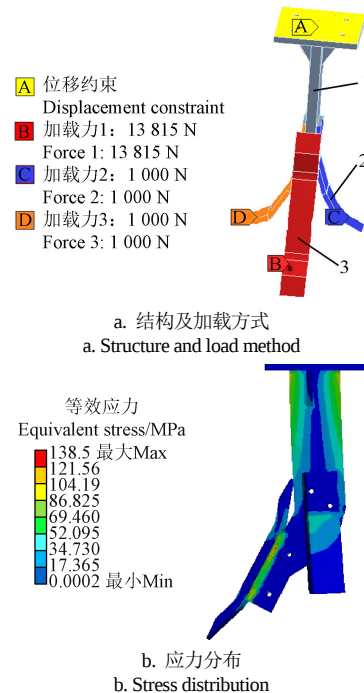
图 3 切土节距示意图

Fig.3 Diagram of soil cutting pitch

2.2 导向装置

东北地区土壤紧实度高,土壤耕作阻力大,同时机器采用双翼犁式犁进行开沟,双翼犁式犁没有犁侧板,由于根茬分布不均匀,开沟后两侧的土壤压力不同,使两侧犁壁土壤紧实度不相同,造成两侧犁壁受到的土壤应力不均匀的情况,从而导致机器开沟轨迹偏移的情况发生。为了解决这一情况,在机器前部加装 3 个深松铲作为导向装置来平衡两侧阻力,深松铲采用双翼深松铲,深松铲入土角为 20°,其余设计要求按照文献[28]进行设计。当导向装置进入土壤后,可以有效的减少由于土壤紧实度不同导致的作业轨迹偏移,同时可以进行破茬作业。导向装置的性能直接影响机具的作业性能。将通过 Solidworks 建立的实体模型导入 ANSYS 中对其进行有限元分析。对导向铲和导向翼施加约束条件并进行求解运算,固定约束与载荷如图 4a 所示。图 4b 为导向装置有限

元分析应力分布。由图 4b 可知:导向装置所受的最大应力分布在导向铲处,为 138.92 MPa,远小于材料的许应力,导向装置有足够的强度支撑平衡土壤侧向应力。此外,在实际工作中可根据图 4 中分析确定危险部位,定期进行检查,确保机具安全作业。通过试验进行验证后,导向装置的入土深度在 100 mm 时,开沟直线度稳定,且机器阻力在允许范围内。



1.铲柱 2.导向翼 3.导向铲

1.Shovel shank 2.Guide wing 3.Guide shovel

注: A 为固定面, B 为正面载荷受力面, C、D 为侧面载荷受力面。

Note: A is a fixed surface, B is the face of the front load, and C and D are the side load surfaces.

图 4 导向装置结构示意图及有限元分析

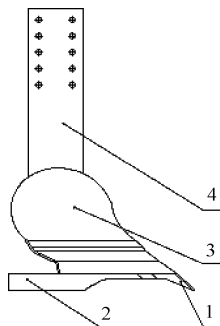
Fig.4 Structure diagram and finite element analysis of guiding device

2.3 开沟装置

为了满足秸秆深还开沟要求,通过对现有铧式犁主犁体进行改进,设计了喙式导向开沟犁体(图 5),在开沟器底部设置直刀式嵌入底板,作用相当于铧式犁的犁侧板,在开沟作业时平衡土壤阻力。在嵌入底板前端装有喙式犁铧,作用是切开土堡并将它升运到犁壁。在嵌入底板上部对称接装左右两个曲面犁壁,结构与传统翻土型犁壁相同,作用是破碎和翻转土堡,使土堡翻向两侧形成犁沟。犁柱将犁铧、犁壁和嵌入底板组装在一起构成开沟犁体,并把犁体安装在开沟灭茬机机架上。通过调节犁柱安装高度来改变开沟深度。

喙式导向开沟犁体通过喙式自入土导向犁铧入土,可以有效的减少铧式犁入土的阻力及入土行程。在作业时,单翼犁式犁在纵垂面内,犁侧板不接触沟底,没有向上的支反力,且犁侧板承受犁体工作面的全部侧向力,而双翼犁式犁没有犁侧板,犁体曲面上所受的阻力是一空间任意力系,包括平行于 X 、 Y 、 Z 3 个坐标轴的空间非汇交力 R_X 、 R_Y 、 R_Z , 可以将所有的空间力投影到喙式

导向开沟犁体的直刀式嵌入底板中进行平衡,直刀式嵌入底板作用相当于铧式犁的犁侧板,开沟犁深入土层后,应力作用于直刀式嵌入底板的两侧面,由于直刀式嵌入底板具有一定的长度,可以平衡两侧犁翼所受的不均匀土壤应力,避免犁体侧向偏移。犁柱高度可以调节,以满足不同开沟深度。



1. 喙式犁铧 2. 嵌入底板 3. 犁壁 4. 犁柱
1. Plow share of beak type 2. Embedded plate 3. Moldboard 4. Plow stand

图5 喙式导向开沟犁结构示意图

Fig.5 Structure diagram of guide furrowing plow of beak type

当拖拉机和开沟灭茬机构成的机组作业时,喙式犁铧自行入土,当达到预定土层并稳定工作后,嵌入底板进入相应土层,嵌入预定的直线位置来平衡两侧曲面犁壁的不均匀受力,从而使喙式导向开沟犁体径直向前行走并向两翼均匀分土,从而达到开沟器按预定设计准确开沟的目的。

3 开沟灭茬机田间试验

3.1 试验条件与试验设计方法

3.1.1 试验条件

在吉林省榆树市恩育乡进行了样机田间试验(作业区面积为 3 hm^2 ,试验选用面积为 0.25 hm^2),该地区为旱作农业区,土壤为壤性土与黏性土混合土质,使用TRIME-EZC土壤水分测定仪(测量范围:0~100%体积含水量;测量精度: $\pm 0.5\%$,德国IMKO公司)测得土壤含水率为19%~25.6%(0~15 cm),使用SC-900数显式土壤紧实度仪(测量范围:0~45 cm,0~7 000 kPa;测量精度: $\pm 103\text{ kPa}$,美国SPECTRUM公司)测得土壤紧实度,1~20 cm深度的土壤紧实度 $78\sim 1\,797\text{ kPa}$,21~40 cm深度的土壤坚实的度为 $1\,826\sim 2\,277\text{ kPa}$ 。于2015年9月24日玉米收获后进行,玉米残茬高度为5~8 cm,开沟深度为35 cm。开沟灭茬机配套动力为Lovol M1204-D型拖拉机,功率88.2 kW。

3.1.2 试验设计与试验方法

1) 试验设计

影响开沟灭茬机作业阻力的主要因素有开沟深度、灭茬深度、导向铲入土深度、灭茬刀转速、土壤坚实度、土壤含水率等。大量研究表明开沟深度对作业阻力有显著的影响,但导向铲入土深度、灭茬刀转速对作业阻力的影响尚需确定。本文把开沟深度固定为35 cm,在相同的土壤坚实度和土壤含水率条件下,根据文献[29-30]以

及实际田间作业经验,试验研究导向铲入土深度、灭茬刀转速、灭茬深度对作业阻力和灭茬碎土率的影响。灭茬刀片排列形式及数量都对灭茬作业质量有影响,考虑到实际试验的可操作性,刀片的排列跟刀片数量作为不变量,在本次试验中不做考量。因此以机器导向铲入土深度 A 、灭茬刀转速 B 、灭茬深度 C 作为试验因素,以作业阻力 y_1 和灭茬碎土率 y_2 作为试验指标,选定正交试验方法,制定试验方案,实施试验并测定和计算试验指标。通过试验结果分析,判断试验因素对指标影响的主次顺序,确定试验指标最优时各因素的最优组合,从而优化机器的结构参数和工作参数。应用DPS7.5软件进行试验结果的分析。

试验选取 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,根据前期预试验结果,确定因素水平如表2所示,制定试验方案并调整各因素水平进行试验,测得试验结果如表3所示。

表2 试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平 Levels	导向铲入土深度 Depth of guide shovel A/mm	灭茬刀转速 Rotary speed of stubble breaking blade $B/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	灭茬深度 Depth of stubble breaking C/mm
1	100	260	60
2	150	300	70
3	200	340	80

表3 正交试验方案及结果

Table 3 Plan and results of orthogonal test

试验号 Number	导向铲入土深度 Depth of guide shovel A	灭茬刀转速 Rotary speed of stubble breaking blade B	灭茬深度 Depth of stubble breaking C	空列 Vacant column	作业阻力 Tillage resistance y_1/kN	灭茬碎土率 Rate of stubble cleaning and soil breaking $y_2/\%$
1	1	1	1	1	18.2	74.6
2	1	2	2	2	24.1	89.5
3	1	3	3	3	30.6	90.5
4	2	1	2	3	26.7	78.2
5	2	2	3	1	28.3	84.5
6	2	3	1	2	21.3	90.4
7	3	1	3	2	39.1	76.5
8	3	2	1	3	29.8	85.5
9	3	3	2	1	34.5	89

2) 试验方法

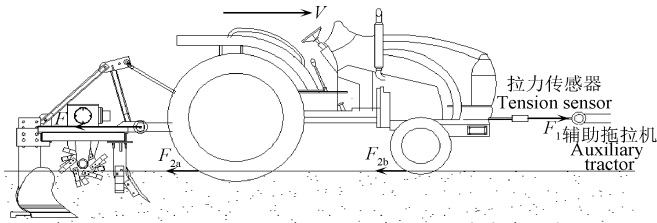
试验前按照文献[31]规定选择试验区,对机器进行试运转和调试,使机器达到最佳工作状态。

作业阻力是开沟灭茬机作业效率的重要指标。试验过程中将拉力传感器装在开沟灭茬机组(开沟灭茬机+Lovol M1204-D型拖拉机)前部,用一台辅助拖拉机(东汽DQ1004拖拉机)通过LLB-50机械式拉力传感器(测量范围:0~50 kN,精度为 $\pm 2\%$,上海实干实业有限公司)牵引作业拖拉机田间行走,滚动阻力为辅助拖拉机牵引作业拖拉机空行时拉力传感器所受拉力,其中开沟灭茬机组为悬挂待作业状态。机组总牵引力为辅助拖拉机牵引机组稳定工作时拉力传感器所受的拉力,如图6a所

示。其中辅助拖拉机均以 1.2 m/s 的速度前进。再由式 (6) 计算出作业阻力, 即

$$F = F_1 - F_2 \quad (6)$$

式中 F 为作业阻力, kN; F_1 为机组牵引阻力, kN; F_2 为拖拉机的滚动阻力, kN, 由前轮滚动阻力 F_{2a} 和后轮滚动阻力 F_{2b} 组成。



a. 阻力测试示意图
a. Diagram of resistance test

注: V 为机具前进速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; F_1 为机组牵引阻力, kN; F_{2a} 为后轮滚动阻力, kN; F_{2b} 为前轮滚动阻力, kN。

Note: V is the advancing velocity of this machine; $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; F_1 is tractive resistance of unit, kN; F_{2a} is rolling resistances of back wheel and F_{2b} is rolling resistances of front wheel, kN



b. 样机试验现场
b. Testing site for prototype

图 6 田间试验

Fig.6 Field test

灭茬碎土率是开沟灭茬机作业性能的一个重要指标。图 6b 为样机试验现场。试验选定具有代表性的距离为 20 m 的开沟行程, 均匀选取 10 个点作为测量区, 在每一测量区内沿垂直于沟壁方向随机选定 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 区域为测量区, 采集测量区内灭茬深度范围内的土块和根茬, 土块和根茬的大小按其最长边分为小于或等于 5 cm 和大于 5 cm 二级。并以小于或等于 5 cm 的土块和根茬质量占总质量的百分比为这一测量区的灭茬碎土率。结果按式 (7) 计算, 并按式 (8) 计算平均值作为灭茬碎土率。由表 2 可知该机灭茬碎土率大于 70%, 符合文献[32]规定灭茬碎土率大于等于 55 % 的技术指标。

$$E_i = \frac{W_{ai}}{W_{bi}} \times 100\% \quad (7)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式中 E 为灭茬碎土率, %; E_i 为第 i 个测量区域内的灭茬碎土率, %; W_{ai} 为第 i 个测量区内开沟机抛落土块中最长边小于或等于 5 cm 的土块质量, g; W_{bi} 为第 i 个 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 测量区内开沟机抛落土块的总质量, g; N 为测量区个数, $N=10$ 。

3.2 试验结果与讨论

在 DPS7.5 软件中输入原始数据, 显著水平定为 $\alpha=0.05$ 。输入处理和空闲因子总数为 4, 多重法比较选择 Tukey 法, 极差与方差分析结果如表 4 与表 5 所示。

表 4 极差分析

Table 4 Range analysis

试验指标 Test index	项目 Items	导向铲入土深度 Depth of guide shovel A	灭茬刀转速 Rotary speed of stubble B	灭茬深度 Depth of stubble C	空列 Vacant column
作业阻力 Tillage resistance y_1	K_1	72.90	84.00	69.30	81.00
	K_2	76.30	82.20	85.30	84.50
	K_3	103.40	86.40	98.00	87.10
	k_1	24.30	28.00	23.10	27.00
	k_2	25.43	27.40	28.43	28.17
	k_3	34.47	28.80	32.67	29.03
	各因素的极差 R	10.17	1.40	9.57	2.03
	因素主次顺序	$A>C>B$			
	因素水平最优组合	$A_1C_1B_2$			
	K_1	254.6	229.3	250.5	248.1
灭茬碎土率 Rate of stubble cleaning and soil breaking y_2	K_2	253.1	259.5	256.7	256.4
	K_3	251	269.9	251.5	254.2
	k_1	84.87	76.43	83.50	82.70
	k_2	84.37	86.50	85.57	85.47
	k_3	83.67	89.97	83.83	84.73
	各因素的极差 R	1.20	13.53	2.07	2.77
	因素主次顺序	$B>C>A$			
	因素水平最优组合	$B_3C_2A_1$			

由表 4 可知, 3 个因素对机器作业阻力影响的主次顺序为因素 $A>$ 因素 $C>$ 空列 $>$ 因素 B , 说明导向铲入土深度对作业阻力的影响最大, 灭茬刀转速的影响较小。3 个因素对灭茬碎土率影响的主次顺序为因素 $B>$ 因素 $C>$ 因素 A , 说明灭茬刀转速对灭茬碎土率的影响最大, 其次为灭茬深度, 导向铲入土深度的影响最小。

由表 5 可知, 对于试验指标作业阻力来说, B (灭茬刀转速) 因素的影响较小, 将其归入误差。 $y_{1A}=40.46>F_{0.01}(2,4)=18$, 所以因素 A (导向铲入土深度) 对作业阻力的影响极显著。 $y_{1C}=29.95>F_{0.01}(2,4)=18$, 所以因素 C (灭茬深度) 对作业阻力的影响也极显著。

表 5 方差分析

Table 5 Variance analysis

试验指标 Test index	方差来源 Source	离差平方和 Sum of squares of deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Significance
作业阻力 Tillage Resistance y_1	A	186.25	2	93.12	40.46	**
	C	137.89	2	68.94	29.95	**
	误差	9.21	4	2.30		
	总和	333.3	8			
	灭茬碎土率 Rate of stubble cutting and soil breaking y_2	296.51	2	148.25	40.62	**
	误差	21.90	6	3.65		
	总和	318.41	8			

注: **表示因素对试验指标的影响极显著, 显著性水平大于 0.01。

Note: ** shows that the corresponding factor has significant effect on test index, the significant level was higher than 0.01.

对于试验指标灭茬碎土率来说, A 因素和 C 因素的影响较小, 将其归入误差。 $y_{2B}=40.62>F_{0.01}(2,6)=10.92$, 所以因素 B (灭茬刀转速) 对灭茬碎土率的影响极显著。

综合表 4 极差分析和表 5 方差分析, 作业阻力最小的组合为 $A_1C_1B_2$, 灭茬碎土率最大的组合为 $B_3C_2A_1$ 。因素 B 灭茬刀转速对作业阻力的影响不显著, 但对灭茬碎土率有极显著影响。因素 A 和因素 C 对作业阻力有极显著影响, 对灭茬碎土率无显著影响。所以选择对作业阻力影响显著的因素 A 和 C 的优水平 A_1 、 C_1 和对灭茬碎土率影响显著的因素 B 的优水平 B_3 组合为使得作业阻力和灭茬碎土率 2 个试验指标最优的组合 $A_1B_3C_1$, 即导向铲入土深度为 100 mm、灭茬部件转速 340 r/min、灭茬部件入土深度为 60 mm 时, 开沟阻力最小, 且灭茬碎土率最佳。

由于最优组合为 $A_1B_3C_1$ 不在设计的 9 个试验当中, 同时, 表 4 得出的作业阻力最小的最优组合 $A_1C_1B_2$ 和灭茬碎土率最大的最优组合 $B_3C_2A_1$ 也不再其中, 故需要进行对比验证试验。调整开沟灭茬机结构参数和工作参数为 $A_1B_3C_1$ 、 $A_1C_1B_2$ 和 $B_3C_2A_1$, 按照文献[31]中规定的测试方法进行试验。将试验指标灭茬碎土率跟行业标准进行比较。经过优化后的样机试验指标跟行业标准对比结果如表 6 示, 其中表中结果为 10 次结果的均值。

表 6 试验结果对比
Table 6 Test result comparison

项目 Item	开沟深度稳定性 Stability of ditching depth/%	灭茬碎土率 Rate of stubble cleaning and soil breaking/%	作业阻力 Tillage resistance/kN
标准要求 Standards	≥80	≥55	
$A_1B_3C_1$	92.4	96.3	21.6
$A_1B_2C_1$	84.3	79.6	20.4
$A_1B_3C_2$	86.8	97.5	26.9

注: 按照文献[13]规定, 样机的开沟深度稳定性指标应该符合当地农艺要求, 根据实际农艺要求灭茬碎土率应该大于 70%。
Note: According to reference [13], stability of ditching depth of prototype should meet agronomic requirements; and according to actual requirements of agronomic, rate of stubble cleaning and soil breaking should be greater than 70%.

从表 6 中可以看出开沟灭茬机在最优组合为 $A_1B_3C_1$ 时, 作业性能优于标准要求, 样机实际的开沟深度稳定性为 92.4%, 为 3 组中最高, 同时其余两组只在单项性能上达到最优, 而 $A_1B_3C_1$ 能够满足实际要求, 灭茬碎土率为 96.3%比标准高出 41.3%, 能够很好的满足作物种植要求, 远高于 $A_1B_2C_1$ 组合的 79.6%。在作业阻力上也低于 $A_1B_3C_2$ 的 26.9 kN。由验证试验可知, 在开沟深度为 35 cm, 样机结构参数和工作参数调整为最优组合 $A_1B_3C_1$ 时, 其作业阻力最小, 灭茬碎土率最大, 且开沟深度稳定性最好。

4 结 论

1) 秸秆深埋还田开沟灭茬机可一次完成开沟、灭茬、碎土作业, 用于东北地区秸秆深埋还田开沟环节, 与秸秆混肥还田机、覆土起垄机配合可把农作物秸秆、肥料等深埋于 20~30 cm 土层。开沟稳定性、灭茬碎土效果达到农艺要求。

2) 对开沟灭茬机关键部件进行了设计和研制, 采用内外侧不同长度的切刀正转对残茬进行切削粉碎, 保证灭茬率; 采用双翼深松铲实现导向, 减小少由于土壤紧实度不同导致的作业轨迹偏移, 并实现破茬作业; 喙式导向开沟犁体通过喙式犁铧入土并减小阻力和入土行程, 嵌入底板平衡双向翻土阻力, 提高开沟稳定性。

3) 通过对样机的田间试验, 样机的前进速度为 1.2 m/s, 开沟深度为 35 cm, 导向铲入土深度为 100 mm, 灭茬刀转速为 340 r/min, 灭茬深度为 60 mm 时, 样机的作业性能最好, 灭茬破土率达 97.5%, 能够很好的满足开沟灭茬碎土要求; 开沟深度稳定性达 86.8%, 满足后续作物种植农艺要求。

田间试验的过程中发现玉米根茬分布不均, 使得开沟犁在工作过程中相邻两沟深度有偏差, 为了解决这一问题可在开沟装置前加装破茬刀, 其开沟深度稳定性、灭茬碎土能力、作业效率等有待于进一步的研究与分析。

[参 考 文 献]

- [1] 何莹莹, 杨路云, 王逸姣. 我国秸秆焚烧的现状分析及建议[J]. 四川农业科技, 2015(8): 9—11.
He Yingying, Yang Luyun, Wang Yijiao. Present situation analysis and suggestion on straw burning in China[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2015(8): 9—11. (in Chinese with English abstract)
- [2] 周良. 对国内秸秆利用现状的思考[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15853—15855.
Zhou Liang. Thoughts on the domestic present condition of straw utilization[J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(32): 15853—15855. (in Chinese with English abstract)
- [3] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 9—13.
Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Zheng Fangcheng, et al. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 9—13. (in Chinese with English abstract)
- [4] 彭立群, 张强, 贺克斌, 等. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109—1118.
Peng Liqun, Zhang Qiang, He Kebin, et al. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in china based on a national questionnaire[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(8): 1109—1118. (in Chinese with English abstract)
- [5] 苏瑜, 黄连光, 王秀敏, 等. 秸秆焚烧现状与对策探讨[J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(3): 113—114.
Su Yu, Huang Lianguang, Wang Xiumin, et al. Aanalysis on present condition and countermeasures of straw burning[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2012, 53(3): 113—114. (in Chinese with English abstract)
- [6] 毕于运, 王亚静, 高春雨, 等. 我国秸秆焚烧的现状危害与禁烧管理对策[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(27): 13181—13184.
Bi Yuyun, Wang Yajing, Gao Chunyu, et al. Problems of burning straw and its management countermeasures in China[J]. Problems of Burning Straw and Its Management Countermeasures in China, 2009, 37(27): 13181—13184. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭大伟. 秸秆焚烧现状及利用建议[J]. 现代农业科技, 2016(9): 187—190.

- [8] 窦森, 陈光, 关松, 等. 秸秆焚烧的原因与秸秆深还技术模式研究[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 1—8.
Dou Sen, Chen Guang, Guan Song, et al. Why burning of corn stover in fields and technical models studies of it's deep incorporation to subsoil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38(5): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵改宾. 间隔深松配套机具及其机理的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Zhao Gaibin. Study on the Match Implement for Zone Tillage and its Mechanisms[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈富强, 张玉龙, 黄毅, 等. 不同剂量秸秆还田的保墒效果及其对玉米产量的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 247—250.
Chen Fuqiang, Zhang Yulong, Huang yi, et al. Effect of retuning crop residual as mulch on soil moisture and corn yield[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 247—250. (in Chinese with English abstract)
- [11] 方志超, 刘玉涛, 丁为民, 等. 微生物菌喷施对集沟还田稻麦秸秆的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 187—194.
Fang Zhichao, Liu Yutao, Ding Weimin, et al. Effect of microbial spraying on wheat and rice straw returning to ditch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(23): 187—194. (in Chinese with English abstract)
- [12] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(2): 138—142.
Jia Wei, Zhou Huaiping, Xie Wenyan, et al. Effects of long-term returning corn stalks to the field combined with applying fertilizer in autumn on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2008, 23(2): 138—142. (in Chinese with English abstract)
- [13] 崔婷婷, 窦森, 杨轶因, 等. 秸秆深还对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 718—725.
Cui Tingting, Dou Sen, Yang Yinan, et al. Effect of deep applied corn stalks on composition of soil humus and structure of humic acid[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 718—725. (in Chinese with English abstract)
- [14] 朱姝, 窦森, 陈丽珍. 秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 747—758.
Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen. Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 747—758. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈丽珍. 亚表层培肥对土壤团聚体有机质特征的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
Chen Lizhen. Effect of Improving Subsurface Soil Fertility on Soil Organic Matter Characteristics of Aggregates[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [16] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对水分入渗及蒸发的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 34—38.
Qiao Hailong, Liu Xiaojing, Li Weiqiang, et al. Effects of straw deep mulching on soil moisture infiltration and evaporation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 34—38. (in Chinese with English abstract)
- [17] 花伟东, 郭亚芬, 张忠学. 坡耕地局部打破犁底层对水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 213—216.
Hua Weidong, Guo Yafen, Zhang Zhongxue. Influence of plough pan on broke partially slope farmland to moisture content infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 213—216. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孔德刚, 翟利民, 刘立意, 等. 秸秆深施还田历经时间对蓄水效果的影响[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 90—97.
Kong Degang, Zhai Limin, Liu Liyi, et al. Effect of time on soil water storage capacity after straw deep application[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5): 90—97. (in Chinese with English abstract)
- [19] 邹洪涛, 王胜楠, 闫洪亮, 等. 秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 52—60.
Zou Hongtao, Wang Shengnan, Yan Hongliang, et al. Effects of straw deep returning on soil structure moisture in semiarid region of Northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 52—60. (in Chinese with English abstract)
- [20] 石彦琴, 高旺盛, 陈源泉, 等. 耕层厚度对华北高产灌溉农田土壤有机碳储量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 85—90.
Shi Yanqin, Gao Wangsheng, Chen Yuanquan, et al. Effect of topsoil thickness on soil organic carbon in high-yield and irrigated farmland in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 85—90. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郑洪兵, 齐华, 刘武仁, 等. 玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨[J]. 耕作与栽培, 2014(5): 39—42.
Zheng Hongbing, Qi Hua, Liu Wuren, et al. Present and problem of tillage layer of maize cropland and discussion of optimum tillage layer[J]. Tillage and Cultivation, 2014(5): 39—42. (in Chinese with English abstract)
- [22] 黄毅, 王瑞丽, 赵凯, 等. 辽西旱农区深层水肥调控对土壤主要物理性质和玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 8—13.
Huang Yi, Wang Ruili, Zhao Kai, et al. Effects of deep moisture and fertility regulation on main physical properties of soil and yield of maize in dryland regions in western Liaoning Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵金花, 张丛志, 张佳宝, 等. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 438—449.
Zhao Jinhua, Zhang Congzhi, Zhang Jiabao, et al. Effect of straw returning via deep burial coupled with application of fertilizer as primer on soil nutrients and winter wheat yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 438—449. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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 with English abstract)
- [25] 张启辉, 窦森, 王瑞丽, 等. 机械化秸秆深还机具的临界规模分析及机具配备[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 639—644.
Zhang Qihui, Dou Sen, Wang Ruili, et al. Critical scale analysis and machinery allocation of straw deep returning[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38(5): 639—644. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴子岳, 高焕文, 陈君达. 秸秆切碎灭茬机的模型研究与参数优化[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 44—46.
Wu Ziyue, Gao Huanwen, Chen Junda. Modeling and optimization of a stalk and stubble chopper[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 44—46. (in Chinese with English abstract)

- [27] 吴子岳, 高焕文, 陈君达. 秸秆切碎灭茬机的设计与试验[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(1): 60—64.
Wu Ziyue, Gao Huanwen, Chen Junda. Design and test of chopper of stalk and stubble[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(1): 60—64. (in Chinese with English abstract)
- [28] JB/T 9788-1999 深松铲和深松铲柄[S]. 北京: 全国农业机械标准化技术委员会, 1999.
- [29] 王京凤. 微型果园开沟机的设计分析与优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Wang Jingfeng. Design Analysis and Optimization of Mini Orchard Trencher[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [30] 姚克恒, 刘世豪, 夏拥军, 等. 开沟机作业功耗的正交试验分析及其优化设计[J]. 排灌机械工程学, 2011, 29(6): 529—535.
Yao Keheng, Liu Shihao, Xia Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 529—535. (in Chinese with English abstract)
- [31] NY/T 740-2003 田间开沟机械作业质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [32] JB/T 6678-2001 秸秆粉碎还田机[S]. 北京: 全国农业机械标准化技术委员会, 2001.

Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw

Wang Ruili¹, Yang Peng¹, Rabiul Falalu Jahun^{1, 2}, Dou Sen^{3*}

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Bayero University, Kano 999062, Nigeria;

3. College of Resources and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Returning and deep burying of crop straw into soil is an effective way to utilize and recycle the resource of straw, to decrease pollution and increase soil fertility. Deep furrowing is the key operation of the technology. The burying quality of present machine is decreased for there is no stubble breaking device and large soil blocks are lifted together with the undetached stubbles, and the operation cost increases for the shattering of stubbles and soil blocks after straw burying. A combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw was developed in this study to solve above problems. The machine thus combined the functions of stubble cleaning and furrow opening. The machine consisted of a furrowing plow, a guide shovel and a stubble breaking unit. The furrowing plow was designed to cut at different depths into the soil. Critical components of the machine, such as furrowing plow of beak type, shovel guide and stubble breaking unit, were designed to withstand the tillage resistance. The 3D (three-dimensional) models of shovel guide and furrowing plow were set up and the structural strength analyses were carried out using Solidworks and ANSYS software respectively. A gear reduction transmission system was designed to control the rotational speed of the smasher shaft from the PTO (power take off). Field performance evaluation test was carried out in Jilin Province. An orthogonal experiment of 3 factors with 3 levels was conducted to investigate the effects of depths of guide shovel, rotary speed of stubble breaking blade and depth of stubble breaking on tillage resistance and rate of stubble cutting and soil breaking. The depth of guide shovel was selected as 100, 150 and 200 mm; the rotary speed was set at 260, 300 and 340 r/min and the depth of stubble smasher was at 60, 70 and 80 mm respectively. Analysis of variance (ANOVA) showed that the rotary speed of stubble breaking blade had significant effect on the rate of stubble cutting and soil breaking at probability level of 1%; the depths of guide shovel and stubble breaking had significant effects on the resistance force at 1% level of significance as well. So, it could be inferred from the statistical analysis result that the rotary speed of stubble breaking blade had no influence on the tillage resistance, while the depths of soil cut of both guide shovel and stubble breaking influenced the resistance, and consequently affected the tillage power requirement of the machine. The evaluated results further showed that the optimum tillage resistance and the rate of stubble cleaning and soil breaking were 21.6 kN and 96.3% respectively at a rotary speed of 340 r/min and depths of the guide shovel and stubble cleaning of 100 and 60 mm respectively. Results of the strength analysis showed that the structural strength of the machine was adequate for the service condition. It could be concluded that the developed combine machine is efficient in deep furrowing, shattering soil, breaking stubble and burying chopped corn straw with a good operation quality.

Keywords: mechanization; crops; design; deep buried returning; soil ditching; stubble breaking; soil breakage