doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.008

免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验

贾洪雷[1,2]　刘　行[1,2]　余海波[1,2]　路　云[1,2]　郭春江[1,2]　齐江涛[1,2]
(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要: 机具的清茬效率是秸秆覆盖条件下免耕播种的重要指标。针对东北地区保护性耕作模式,在吉林省康达农业机械有限公司生产的2BMZF-2型免耕播种机上,改进设计一种具有凹面结构的秸秆清茬机构,分析了播种机作业速度、清茬轮入土深度以及清茬轮运动偏角等因素对清茬效果的影响。根据仿真分析以及田间试验结果确定了清茬机构的关键参数,以及最佳工作参数组合为:清茬轮轮盘直径 D 为 350 mm、运动偏角 λ 为 37.5°、机具速度 v_0 为 2.77 m/s、入土深度 d 为 70 mm。在上述参数条件下进行田间试验时,清茬率可达到 83.61%。结果表明,所设计的清茬机构可有效清洁种床、减少机具堵塞,可以为东北地区玉米免耕播种作业提供技术支撑。

关键词: 免耕播种机; 秸秆覆盖; 清茬轮; 仿真分析; 田间试验
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0068-10

Simulation and Experiment on Stubble Clearance Mechanism with Concave Claw-type for No-tillage Planter

JIA Honglei[1,2]　LIU Hang[1,2]　YU Haibo[1,2]　LU Yun[1,2]　GUO Chunjiang[1,2]　QI Jiangtao[1,2]
(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering*, *Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*
2. *School of Biological and Agricultural Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*)

Abstract: The stubble clearance efficiency of instrument is an important indicator of no-tillage seeding under the mode of protective farming mode. Based on the conservation tillage model in Northeast China, a straw cleaning mechanism with concave structure was designed and improved on the 2BMZF-2 no-till planter produced by Jilin Kangda Agricultural Machinery Co., Ltd. In addition, factors such as the operating speed of planter in the stubble clearance mechanism, the soil contacting depth of stubble clearance wheel and the movement declination angle of stubble clearance wheel were analyzed. The key parameters of stubble clearance mechanism were identified according to the simulation analysis and the analysis on the results of field trial, which can be listed as follows: the diameter of stubble clearance wheel disc was 350 mm, the angle between the movement direction of the stubble clearance wheel and the working direction of no-tillage planter was 37.5°, and the soil contacting depth was 70 mm. The result of the experiment indicated that the stubble clearance rate could reach up to as high as 83.61% at the operating speed of 2.77 m/s. The stubble clearance mechanism designed could effectively clean the seedbed and prevent the blocking of instrument, which, in the meantime, was suitable for the uniform ridge farming mode of maize as well as the wide and narrow row farming mode of maize.

Key words: no-tillage planter; straw mulching; stubble clearance wheel; simulation analysis; field trial

0　引言

保护性耕作模式中的秸秆还田环节,可以改善土壤结构培肥地力,显著提高土壤微生物活性[1-3]。我国东北地区,玉米秸秆粗大量多,还田作业后不易腐烂,导致播种质量下降、作物出苗率降低[4-5],特别是在玉米宽窄行种植模式下,由于窄行播种单体距离变近,单位幅宽内秸秆覆盖率增加,秸秆经翻抛后更易于卷入并积聚在清茬机构与相邻部件之间,进而造成堵塞。目前主要的清茬装置有两类:一种

收稿日期: 2018-06-28　修回日期: 2018-07-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD070030201)和国家自然科学基金项目(31401284)
作者简介: 贾洪雷(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与仿生智能农业机械研究,E-mail: jiahl@vip.163.com
通信作者: 齐江涛(1981—),男,副教授,博士生导师,主要从事精准农业与智能农机装备研究,E-mail: qijiangtao@jlu.edu.cn

是主动式清茬机构，一种是被动式清茬机构[6-7]。主动式清茬机构适用于高速旋耕作业，但该装置能耗高、动土量大、机器振动噪声大、作业环境差、安全性差[8-10]。被动式清茬装置多为破茬刀和清茬轮的组合装置，对秸秆覆盖量的适应性差，难以解决秸秆覆盖量大时的堵塞问题[11-13]。

本文针对东北地区保护性耕作模式，设计一种具有凹面结构的秸秆清茬机构，能对农田地表覆盖的玉米秸秆进行有效清理。作业时，清茬机构轮爪将秸秆向后抛，其凹面结构对与轮爪接触的秸秆施加侧推力，使秸秆抛向侧后方，从而达到更好的清理效果。

1　清茬机构设计与分析

1.1　整机结构

设计的清茬机构安装在吉林省康达农业机械有限公司生产的 2BMZF－2 型免耕播种机上，整机主要包括：清茬装置、施肥装置、播种装置、开沟装置以及覆土镇压装置。免耕播种机的主要技术参数：整机质量 776 kg，播种幅宽 1 200～1 400 mm，播种行数为 2 行，行距为 560～700 mm，播种深度为 50～70 mm，施肥深度为 80～100 mm，作业速度为 4～10 km/h，理论株距为 120～450 mm。所设计的凹面爪式清茬机构安装在免耕播种机前端位置，具体位置如图 1 所示。

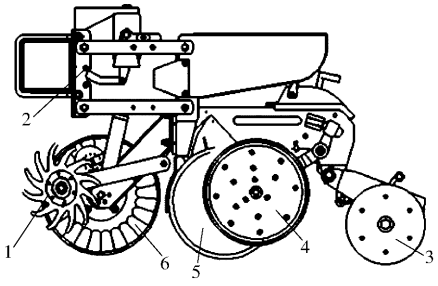


图 1　免耕播种机结构简图

Fig. 1　Structure diagram of no-tillage planter

1. 凹面爪式清茬机构　2. 机架　3. 镇压轮　4. 限深轮　5. 开沟器　6. 破茬刀

1.2　清茬装置结构

保护性耕作模式中，清茬机构对于地表秸秆的清理效果与免耕播种机前进速度、清茬轮入土深度以及清茬轮运动偏角等有关。清茬机构与免耕播种机通过左右弯臂相连接，通过凸轮可以调整清茬轮入土深度、降低土壤扰动量，保证种床清洁质量。凹面清茬轮呈“人”字型交错安装在支臂架上，如图 2 所示。两个清茬轮为交错结构、配合使用，前端收敛且有重合工作区域 δ，轮盘周围均匀分布着轮爪[14]。

作业时，凹面清茬轮在免耕播种机的牵引下向前运动，此时凹面清茬轮同地表及其覆盖物相接触，产生摩擦力，在力偶作用下使得轮爪转动；作业的轮爪捡拾并翻抛秸秆，达到清理种床的目的。

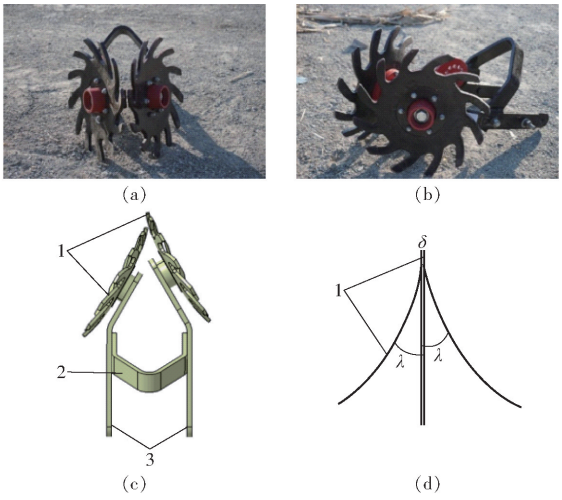


图 2　清茬机构

Fig. 2　Clearance mechanisms

1. 清茬轮轮盘　2. 弯臂　3. 支架

1.3　清茬机构参数确定

1.3.1　清茬轮轮盘参数

(1)啮合点高度

清茬机构在工作时，两轮收敛于啮合点，清茬轮啮合高度 h 为啮合点到地面的距离。秸秆还田清茬作业设计要求 h 略小于秸秆及杂草高度[15]，本文 h 取 40 mm。

(2)清茬轮轮盘直径

如图 3 所示，清茬轮的各轮爪以后倾形式均匀分布在凹面轮盘周围，清茬轮轮爪刃角与接触地面相垂直。

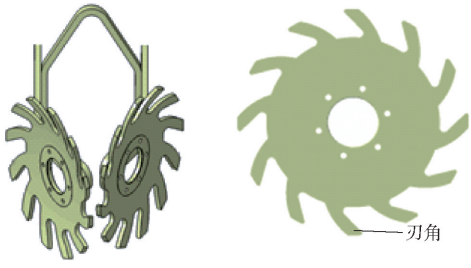


图 3　清茬轮轮盘三维图

Fig. 3　3D diagram of stubble clearance wheel disc

根据清茬轮入土深度、土壤中扰动量及根茬处理要求等，参照农业机械设计手册凹面圆盘耙片的设计[16]，设计凹面轮盘投影直径为

$$D = Kd \tag{1}$$

式中　D——清茬轮轮盘投影直径，mm

K——径深比

d——清茬轮入土深度，mm

通过调节凸轮机构改变清茬机构入土深度，保

证种床清理效果的同时避免不必要的土壤扰动,入土深度 d 取值范围为 50 mm≤d≤70 mm,本文 K 取 5,所设计的清茬轮最大入土深度为 70 mm,由公式(1)将轮盘投影直径设计为 350 mm。

(3)清茬机构凹面轮盘曲率半径

所设计清茬轮由安装平面、工作曲面(凹面轮盘)两部分组成,凹面轮盘的曲率半径是该机构的主要工作参数,其曲率半径 ρ 越大,清茬轮越接近平面,土壤扰动量越小,但其对秸秆翻抛能力越小;反之,轮盘曲率半径减小,土壤扰动量增加,但秸秆侧抛效果增强,种床清理效果增强。因此,需合理选择曲率半径,借鉴凹形圆盘式垄台清理装置的设计参数[13]、综合农业机械设计手册技术要求[16],将清茬轮轮盘曲率半径 ρ 设定为 1 346 mm。

1.3.2 清茬轮轮爪的参数

(1)布置形式

轮爪布置形式按方向可分为径向、前倾、后倾 3 种,如图 4 所示。



图 4 轮爪的布置形式

Fig. 4 Distribution patterns of finger

轮爪布置为径向形式时,利于拨茬、捡拾等作业步骤,但秸秆及杂草被清茬轮捡拾后旋转一周又被翻抛回清茬轮的前端,不利于脱茬,会造成清茬机构被秸秆和杂草缠绕,引发机具二次堵塞。

轮爪布置为前倾形式时,清茬轮低速作业情况下,轮爪捡拾的秸秆无法向外翻抛而会从爪间自动落下;清茬轮在高速作业情况下,秸秆及杂草在清茬轮轮爪间会发生自锁,不会被抛出也不会掉落,所以清茬轮前倾布置形式不适合清茬作业。

轮爪布置为后倾方式时,后倾角增加有利于秸秆及杂草外抛,且秸秆及杂草越接近清茬轮轮爪端部,向外抛送所满足的角速度越低,越易脱茬[17],所以本文将轮爪布置成后倾形式。

(2)数量

凹面清茬轮轮爪既要满足清茬机构作业强度条件也要保证秸秆及杂草可顺利被抛送,所以轮爪数量并非越多越好。参考中小型免耕播种机防堵机构的设计[6],在保证根齿不夹秆的情况下可以多取[15],本文设计的凹面清茬轮轮爪取 12 个。

1.3.3 清茬轮运动偏角

建立三维坐标系 $Oxyz$,以清茬轮轮爪顶点处在最大入土深度时为坐标原点 O,x 轴、y 轴分别平行和垂直于清茬轮安装平面,z 轴垂直于地表。清茬轮与机具前进方向夹角为 λ,清茬轮运动偏角分析如图 5 所示,运动速度分析如图 6 所示。图中 P 为清茬轮轮爪的任一顶点,图中 P'为轮爪入土时的顶点。

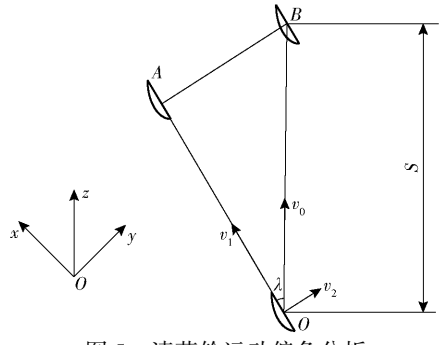


图 5 清茬轮运动偏角分析

Fig. 5 Diagram of motion angle analysis

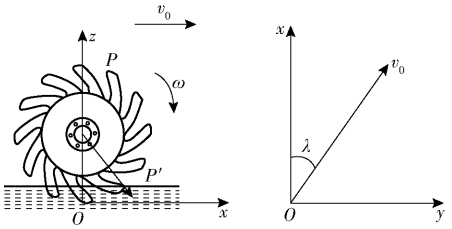


图 6 清茬轮运动速度分析

Fig. 6 Analysis diagram of clearance wheel speed

如图 5 所示,对清茬轮进行模拟运动分析,清茬轮的实际前进速度为 v_0,清茬轮由 O 到 B 的运动可以等同于由 O 滚动到 A,然后再由 A 滑动到 B,即滚动速度为 $v_0\cos\lambda$,滑动速度为 $v_0\sin\lambda$。这里仅仅说明凹形圆盘两种运动(滚动和侧向平移)速度的关系,真实运动过程中,两种运动同时发生,而无先后顺序[13]。

清茬轮有滑移距离 l_{AB},所以清茬轮对于秸秆残茬有侧推作用,当运动偏角 λ 增大时,侧推距离 l_{AB} 就会相应增大,种床清理效果增强,当超过 45°接近于 90°时,清茬轮在前进方向上的推动作用大于向两侧的侧推作用,不利于向两侧翻抛秸秆,作业效果变差;反之,如果运动偏角 λ 减小,滑移距离 l_{AB} 减小,侧推作用也会变小。当运动偏角过小时,清茬轮亦不能将秸秆有效侧推到两侧,会把秸秆翻抛到清茬轮后方,从而导致机具堵塞,所以运动偏角 λ 过大或者过小都将对作业效果产生不利的影响,参考农业机械设计手册中交错双圆盘分草器[16]及平面清茬轮的运动偏角[19],本文 λ 选取 30.0°、37.5°、45.0° 3 个水平。

1.4 清茬轮运动学分析

如图 6 所示,清茬机构作业时,凹面轮盘轮爪触土,轮爪带动秸秆向侧后方运动,理想状态下,凹面

轮盘轮爪顶点的运动轨迹即为秸秆运动轨迹。根据运动轨迹方程，探究秸秆随轮爪顶点同步运动的运动过程，并分析此过程中侧推速度的变化趋势。

由图 6 可得，选取清茬轮轮爪任一顶点 P，分析其运动轨迹，轨迹方程可表示为

$$\begin{cases} x = v_0 t\cos\lambda + R\sin(\omega t) \\ y = v_0 t\sin\lambda \\ z = R(1-\cos(\omega t)) \end{cases} \tag{2}$$

式中　t——免耕播种机运行时间，s

ω——清茬轮转动角速度，rad/s

R——清茬轮投影半径，mm

假设清茬轮在牵引力作用下以角速度 ω 匀速转动，对式(2)中的时间 t 进行求导，可得清茬轮轮爪各顶点的速度分量，具体为

$$\begin{cases} v_x = v_0\cos\lambda + \omega R\cos(\omega t) \\ v_y = v_0\sin\lambda \\ v_z = \omega R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

在 Oxy 平面内，由 v_x 和 v_y 合成得到的速度 v_{xy} 为

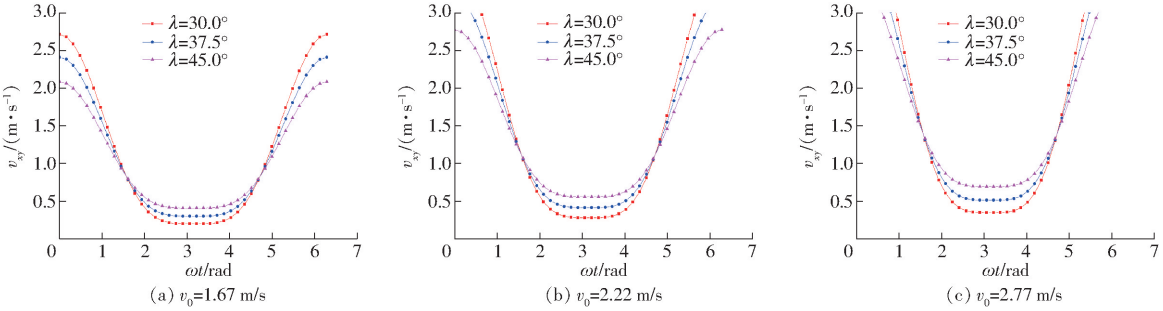
$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = v_0\sqrt{1 + \cos^2\lambda\cos^2(\omega t) + 2\cos^2\lambda\cos(\omega t)} \tag{4}$$

式中　v_{xy}——清茬轮侧推速度，m/s

根据式(4)，利用 Origin 软件绘制出机具速度 v_0 分别为 1.67 m/s(6 km/h)、2.22 m/s(8 km/h)、2.77 m/s(10 km/h)时，清茬轮运动偏角为 30.0°、37.5°、45.0°时，P 点的侧推速度 v_{xy} 随相位角 ωt 的变化图。

如图 7 所示，侧推速度随着相位角的变化而变化[19]，当侧推速度的波动较大时，清茬轮的工作稳定性会降低，影响作业效果和作业效率。当运动偏角 λ =30.0°时侧推速度随相位角的变化波动最大，当 λ =37.5°时侧推速度波动最小。

所设计清茬轮的最大入土深度 d 为 70 mm，由于清茬轮的投影直径为 350 mm，如图 8 所示，在图 8a 中，当相位角 ωt 为 0 rad 时，清茬轮顶点 P_0 在

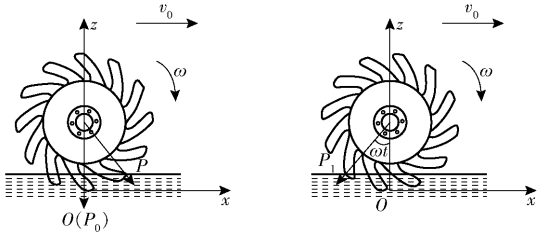


(a) v_0=1.67 m/s　(b) v_0=2.22 m/s　(c) v_0=2.77 m/s

图 7　侧推速度变化曲线

Fig. 7　Changing curves of rolling speed

最大入土深度处，在图 8b 中，清茬轮顶点由 P_0 运动到 P_1 处，此时清茬轮顶点处于出土的状态，根据最大入土深度和清茬轮投影直径可以计算此时的相位角 ωt 为 0.93 rad，因此可以得出相位角 ωt 在 0 ~ 0.93 rad 之间时清茬轮的轮爪在土壤中运动，对土壤产生扰动作用。由于保护性耕作的意义是降低机具对土壤的扰动，ωt 在 0 ~ 0.93 rad 之间时，λ = 37.5°的轮爪侧推速度 v_{xy} 最小，清茬轮轮爪在土壤中运动速度越小，对土壤的扰动越小。



(a) 清茬轮顶点在P_0处，ωt=0 rad　(b) 清茬轮顶点在P_1处，ωt=0.93 rad

图 8　清茬轮轮爪运动状态分析

Fig. 8　Analysis diagrams of clearance wheel movement

综上，λ =37.5°时，清茬轮在地表以下时对土壤扰动较小；轮爪出土后对秸秆具有较稳定的侧推作用，可带动秸秆抛向侧后方。

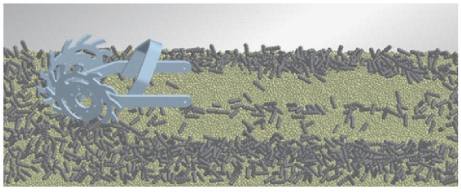
2　清茬机构仿真分析

2.1　清茬轮运动轨迹对比仿真分析

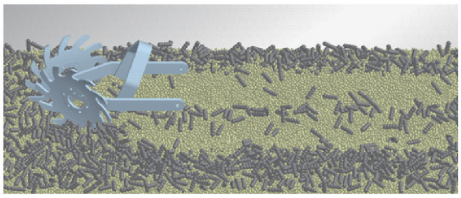
为了验证设计的凹面爪式清茬机构具有良好的清茬效果，采用 EDEM 离散元法建立清茬轮与地面系统力学模型，模拟清茬轮在田间作业时的受力情况，分析比较传统平面清茬轮和凹面清茬轮的清茬作业情况。

首先建立松散土壤状态下的土槽模型和清茬轮模型，将秸秆均匀分布在土槽表面，如图 9 所示；根据清茬轮的受力、转速等参数进行过程模拟；分析比较传统平面清茬轮和凹面清茬轮的清茬效果。参数选择如下：清茬轮投影直径 D = 350 mm、运动偏角 λ = 30.0°、入土深度 70 mm、前进速度 1.67 m/s；凹面清茬轮曲率半径 $\rho \approx 1\,346$ mm。

图 10 为两种清茬轮与土壤颗粒和秸秆作用过程的位移场示意图。清茬轮两侧的土壤颗粒和秸秆



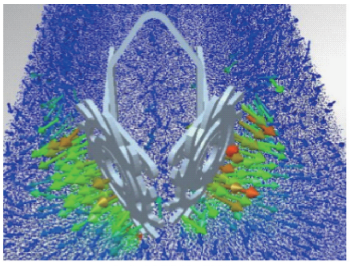
(a) 传统清茬轮



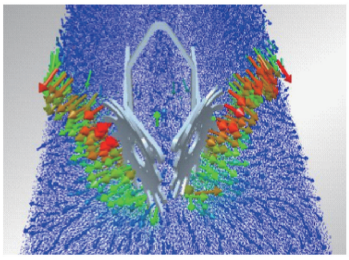
(b) 凹面清茬轮

图 9 清茬机构与土壤模型

Fig. 9 Model of stubble clearance mechanism and soil



(a) 传统清茬轮



(b) 凹面清茬轮

图 10 清茬轮位移场示意图

Fig. 10 Sketches of comparative displacement field of clearance wheel

注:图中线条的长度代表土壤颗粒和秸秆的位移大小,箭头的方向代表土壤颗粒和秸秆的位移方向,线条颜色表示速度大小,颜色越深速度越大

颗粒流动位移较大;图 10b 凹面清茬轮作业中秸秆平均侧向速度为 1.787 2 m/s,图 10a 传统清茬轮秸秆平均侧向速度为 1.364 1 m/s,凹面清茬轮与传统平面清茬轮相比对秸秆产生的平均侧向速度提高了 31.02%。因此,凹面清茬轮可以更好地将播种行的秸秆清理到侧边,具有更好的清茬效果和工作效率。

2.2 凹面清茬机构仿真分析

凹面爪式清茬机构的作业效果与机具前进速度、运动偏角以及入土深度有关。田间试验只能直观地测量不同参数组合对秸秆清茬率的影响,无法确定各因素各水平下清茬机构的秸秆翻抛情况。因此采用控制变量法对各因素各水平进行分析,寻找最佳参数组合,仿真分析试验指标为位移场中的秸秆平均侧向速度,表 1 中的 x_1、x_2 和 x_3 分别代表机具速度、运动偏角和入土深度 3 个因素的编码值,零水平分别为 37.5°、2.22 m/s、60 mm,-1 水平分别为 30.0°、1.67 m/s、50 mm,1 水平分别为 45.0°、2.77 m/s、70 mm。

表 1 试验设计

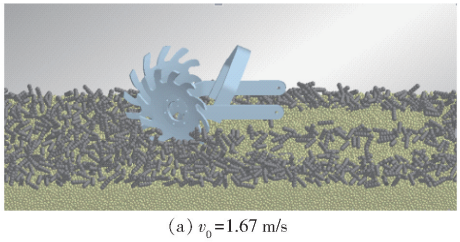
Tab. 1 Test design

试验组	试验号	机具速度 x_1	运动偏角 x_2	入土深度 x_3
1	1	-1	0	0
	2	0	0	0
	3	1	0	0
2	4	0	-1	0
	5	0	0	0
	6	0	1	0
3	7	0	0	-1
	8	0	0	0
	9	0	0	1

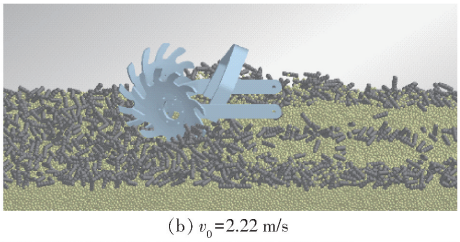
2.2.1 机具速度 v_0 对秸秆运动轨迹的影响

试验组 1 将运动偏角 λ 及入土深度 d 设置为零水平,探究机具速度 v_0 对清茬机构的影响。

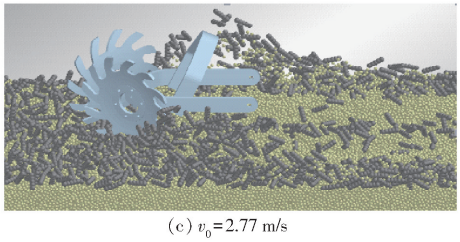
仿真模拟机具在不同前进速度下对秸秆的翻抛情况,如图 11 所示,随着机具速度 v_0 增大,秸秆向两侧翻抛和清理种带效果增强。



(a) v_0=1.67 m/s



(b) v_0=2.22 m/s



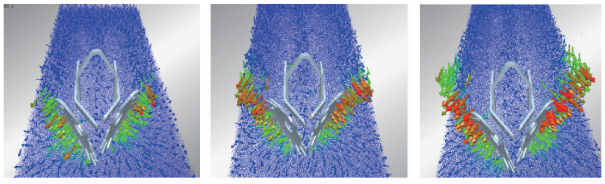
(c) v_0=2.77 m/s

图 11 不同机具速度的秸秆运动轨迹

Fig. 11 Trajectory of straws at different implement speeds

图 12 为 3 种速度条件下的清茬轮与土壤颗粒和秸秆作用过程的位移场示意图。设置运动偏角 λ 及入土深度 d 为零水平时,随着机具速度 v_0 增加,清茬轮两侧的土壤颗粒和秸秆位移变大。如图 12 所示,根据仿真结果,在机具前进速度为 1.67 m/s 时,

秸秆平均侧向速度为 1.823 4 m/s；在机具前进速度为 2.22 m/s，秸秆平均侧向速度为 2.327 2 m/s；在机具前进速度为 2.77 m/s 时，秸秆平均侧向速度为 3.041 2 m/s。随着机具前进速度的增加，凹面清茬轮作业时，秸秆的侧向速度随之增加，在机具速度为 2.77 m/s 时相比于机具速度为 1.67 m/s 时，秸秆平均侧向速度最大增加了 66.79%。随着机具前进速度的增加，清茬作业时，秸秆翻抛位移增加，秸秆侧向速度增大，清茬效果增强。



(a) v_0=1.67 m/s　(b) v_0=2.22 m/s　(c) v_0=2.77 m/s

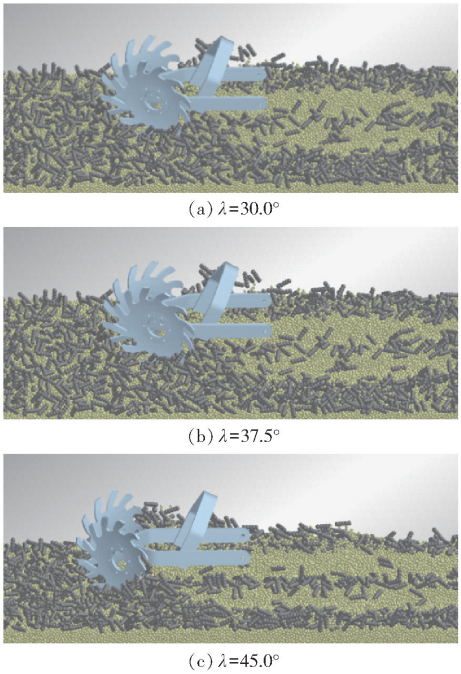
图 12　不同机具速度的秸秆位移场示意图

Fig. 12　Sketches of stalk displacement field at different implement speeds

2.2.2　运动偏角 λ 对秸秆运动轨迹的影响

试验组 2 把机具速度 v_0 及入土深度 d 设置为零水平，探究运动偏角 λ 对清茬机构的影响。

仿真模拟清茬机构在不同运动偏角 λ 条件下，清茬机构作业时秸秆的运动情况如图 13 所示，随着清茬机构运动偏角 λ 增加，秸秆翻抛效果变好，种床清理效果增强。



(a) λ=30.0°

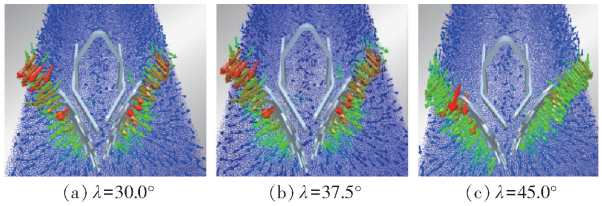
(b) λ=37.5°

(c) λ=45.0°

图 13　不同运动偏角的秸秆运动轨迹

Fig. 13　Trajectory of straws at different angles of motion

图 14 为清茬机构在不同运动偏角水平下与土壤颗粒和秸秆作用过程的位移场示意图。设定清茬机构机具速度 v_0 和入土深度 d 为零水平，随着清茬机构运动偏角 λ 增加，清茬轮两侧秸秆线条速度红色加深，秸秆侧向速度增加。如图 14，清茬机构运动偏角为 30.0°时，秸秆平均侧向速度为 2.035 1 m/s；运动偏角为 37.5°时，秸秆平均侧向速度为 2.327 2 m/s；运动偏角为 45°时，秸秆平均侧向速度为 2.535 2 m/s。根据仿真结果，随着清茬机构运动偏角增加，秸秆侧向速度增加，运动偏角 λ 由 30.0°增大到 37.5°时，秸秆侧向速度增加了 14.36%；运动偏角 λ 由 37.5°增大到 45.0°时，秸秆侧向速度增加了 8.94%。



(a) λ=30.0°　(b) λ=37.5°　(c) λ=45.0°

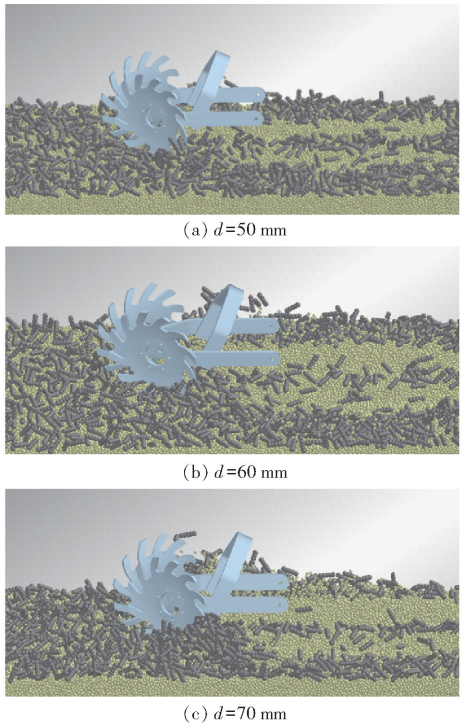
图 14　不同运动偏角的秸秆位移场示意图

Fig. 14　Sketches of stalk displacement field at different angles of motion

2.2.3　入土深度 d 对秸秆运动轨迹的影响

试验组 3 将机具速度 v_0 及运动偏角 λ 设置为零水平，探究对清茬机构的影响。

仿真模拟清茬机构在入土深度不同水平下，清茬机构作业时秸秆的运动情况如图 15 所示，随着清茬机构入土深度增加，秸秆翻抛和清理效果增强。



(a) d=50 mm

(b) d=60 mm

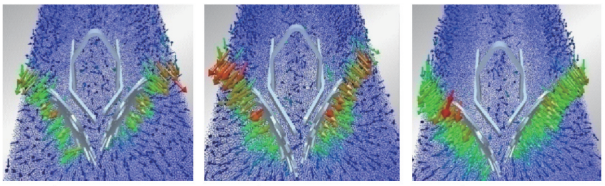
(c) d=70 mm

图 15　不同入土深度的秸秆运动轨迹

Fig. 15　Trajectory of straws at different depths of contact

图 16 为清茬机构在 3 种入土深度水平下与土壤颗粒和秸秆作用过程的位移场示意图。设定清茬

机构运动偏角 λ 及机具速度 v_0 为零水平,如图 16 所示,入土深度 d 为 50 mm 时,秸秆平均侧向速度为 2.461 7 m/s,入土深度为 60 mm 时,秸秆平均侧向速度为 2.327 2 m/s,入土深度为 70 mm 时,秸秆平均侧向速度为 2.908 m/s。在入土深度为 50 ~ 60 mm 区间内,秸秆侧向速度基本不变,在入土深度 50 ~ 70 mm 的整个区间内,秸秆侧向速度增加 17.95%。随着清茬机构入土深度增加,秸秆侧向速度总体呈增加趋势。



(a) d=50 mm (b) d=60 mm (c) d=70 mm

图 16 不同入土深度的秸秆位移场示意图

Fig. 16 Sketches of stalk displacement field at different depths of contact

综上,凹面清茬机构经过 EDEM 因素水平仿真分析可以得到理论的最佳工作参数组合,具体为:机具前进速度 v_0 为 2.77 m/s、运动偏角 λ 为 45°、入土深度 d 为 70 mm。

3 田间试验

通过仿真分析,发现凹面清茬轮对比平面清茬轮具有秸秆翻抛速度快、作业效果好的优越性,因此通过田间试验对其作业性能进一步分析。

3.1 试验地点及条件

吉林省农业机械研究院试验基地实测试验田(图 17),尺寸 50 m × 50 m,两端各预留 10 m。免耕播种机分别以 1.67、2.22、2.77 m/s 的速度作业,沿播种条带每隔 20 cm 采样;秸秆覆盖方式为秋季玉米收获后秸秆全覆盖粉碎还田,播种前地表秸秆覆盖率为 100%,土壤 0 ~ 25 mm 处平均紧实度为 0.102 MPa,25 ~ 50 mm 处为 0.239 MPa,50 ~ 75 mm 处为 0.345 MPa,75 ~ 100 mm 处平均土壤紧实度为 0.424 MPa;0 ~ 50 mm 处平均土壤含水率为 6.3%,50 ~ 100 mm 处平均土壤含水率为 13.2%,100 ~ 150 mm 处平均土壤含水率为 16.4%。



图 17 田间试验

Fig. 17 Field trial of stubble clearance mechanism

3.2 试验方法

根据农业行业标准 NY/T 1628—2008,在秸秆覆盖率不少于 40% 情况下,免耕播种机可顺利通过并不发生堵塞。试验时沿种床每 20 cm 做一个标记,测量长度为 50 m,用标记后的记号除以总记号数,即为种床内秸秆覆盖率[18,20];每个测试区测试 5 次,平均值为该区域的秸秆覆盖率;清茬作业前后,秸秆覆盖率差值即为清茬率,机具按测试内容进行匀速往返作业。

清茬作业后种床内残荐覆盖率为

$$F = \frac{\sum \frac{D_2}{D_1}}{5} \times 100\% \tag{5}$$

式中 F——残茬覆盖率,%

D_1——标记总点数

D_2——残茬点数

根据本文田间试验条件,播种前地表残茬覆盖率为 100%,则种床内清茬率为

$$N = 1 - F \tag{6}$$

式中 N——清茬率,%

3.3 试验方案

根据 Design-Expert 软件中的 Box - Behnken Design(BBD)响应面优化法进行正交试验。选择清茬机构最佳参数组合,同时验证本文所设计清茬机构的清茬效果,并探寻各因素对清茬率的影响。田间试验参数为:运动偏角 λ、机具速度 v_0 以及入土深度 d,试验指标为清茬率 N。试验总次数为 16 次,因素及水平如表 2 所示,作业后地表如图 18 所示,试验方案与结果如表 3 所示。方差分析如表 4 所示。A、B、C 为因素水平值。

表 2 试验因素及水平

Tab. 2 Factors and levels of experiment

水平	运动偏角 λ/(°)	机具速度 v_0/(m·s^{-1})	入土深度 d/mm
1	30.0	1.67	50
2	37.5	2.22	60
3	45.0	2.77	70

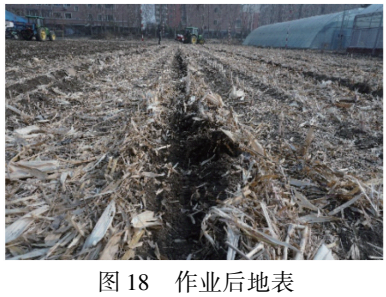


图 18 作业后地表

Fig. 18 Surface picture of field

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test scheme and results

序号	运动偏角 λ/(°)	机具速度 v_0/(m·s^{-1})	入土深度 d/mm	清茬率/%
1	45.0	2.22	50	68.48
2	37.5	1.67	70	74.58
3	37.5	2.22	60	75.99
4	45.0	2.77	60	74.41
5	37.5	2.22	60	76.27
6	30.0	2.77	60	78.96
7	37.5	2.22	60	77.12
8	37.5	2.77	50	78.13
9	30.0	2.22	50	68.29
10	30.0	1.67	60	68.94
11	30.0	2.22	70	76.46
12	37.5	2.22	60	76.92
13	45.0	2.22	70	69.96
14	45.0	1.67	60	66.95
15	37.5	2.77	70	83.61
16	37.5	1.67	50	69.41
17	37.5	2.22	60	78.41

表 4　清茬率方差分析

Tab. 4　Variance analysis of cleaning rate

方差来源	方差和	自由度	均方差	F	P
模型	358.07	9	39.79	75.56	<0.000 1
A	20.64	1	20.64	39.20	0.000 4
B	155.14	1	155.14	294.65	<0.000 1
C	51.51	1	51.51	97.83	<0.000 1
AB	1.64	1	1.64	3.11	0.121 1
AC	11.19	1	11.19	21.25	0.002 5
BC	0.024	1	0.024	0.046	0.836 9
A^2	110.85	1	110.85	210.53	<0.000 1
B^2	1.07	1	1.07	2.03	0.197 1
C^2	4.32	1	4.32	8.21	0.024 1
残差	3.69	7	0.53		
失拟项	0.14	3	0.047	0.053	0.981 8
纯误差	3.55	4	0.89		
总和	361.75	16			

对表 4 中的数据进行二次多元回归拟合，清茬率对自变量的二次多元回归方程为

$$N = 76.94 - 1.61A + 4.4B + 2.54C - 0.64AB - 1.67AC + 0.078BC - 5.13A^2 + 0.5B^2 - 1.01C^2 \quad (7)$$

(1)回归系数显著性检验

表 4 中 P 值小于 0.05 项是影响显著项，因素 A、B、C、AC 对清茬率的影响均为显著项($P<0.05$)。

(2)回归方程的显著性检验

回归方程 F 值为 75.56，回归方程显著性水平为 0.001。

(3)回归模型失拟检验

失拟项的 P 值为 0.981 8，显然 $P>0.05$，回归方程不失拟，清茬率模型实测值与预测值相近，该回归方程在设计域内预测性能良好。

影响清茬率的 3 个影响因素的主次顺序为：机具速度 v_0、入土深度 d、运动偏角 λ。

3.4　数据响应面分析

通过 Design-Expert 分析运动偏角、机具速度、入土深度对田间清茬率的影响。采用控制变量法分析，即将 1 个因素固定，讨论剩余 2 个因素对其试验指标的影响。

(1)运动偏角 λ 和机具速度 v_0 对清茬率的影响

将最大入土深度 C 设置为零水平，即 d = 60 mm，得到运动偏角 A 和机具速度 B 两个影响因素对凹面爪式清茬机构清茬率 N 的二元二次回归方程

$$N = 76.94 - 1.61A + 4.4B - 0.64AB - 5.13A^2 + 0.5B^2 \quad (8)$$

由式(8)和图 19 可知当入土深度 d 固定时，运动偏角 λ 和机具速度 v_0 对清茬率均有显著性影响，且机具速度 v_0 影响更显著；随着机具速度 v_0 的增大清茬率也随之增大；随着运动偏角 λ 的增大，清茬率先增后减且起伏比较大；运动偏角 λ 和机具速度 v_0 之间无交互作用。

(2)运动偏角 λ 和入土深度 d 对清茬率的影响

将机具前进速度 B 设置为零水平，即 v_0 = 2.22 m/s，得到运动偏角 A 和入土深度 C 两个影响因素对凹面爪式清茬机构清茬率 N 的二元二次回归方程

$$N = 76.94 - 1.61A + 2.54C - 1.67AC - 5.13A^2 - 1.01C^2 \quad (9)$$

由式(9)和图 20 可知，当机具速度 v_0 固定时运动偏角 λ 和入土深度 d 对清茬率均有显著性影响，且入土深度 d 的影响更加显著；随着入土深度 d 的增大，清茬率也随之增大且速度增大比较平稳；随着运动偏角 λ 的增大，清茬率先增后减且起伏比较大；运动偏角 λ 和入土深度 d 之间有交互作用。

(3)机具速度 v_0 和入土深度 d 对清茬率的影响

将运动偏角 A 设置为零水平，即 λ = 37.5°，机具速度 B 和入土深度 C 两个影响因素对凹面爪式清茬机构清茬率 N 的二元二次回归方程

$$N = 76.94 + 4.4B + 2.54C + 0.078BC + 0.5B^2 - 1.01C^2 \quad (10)$$

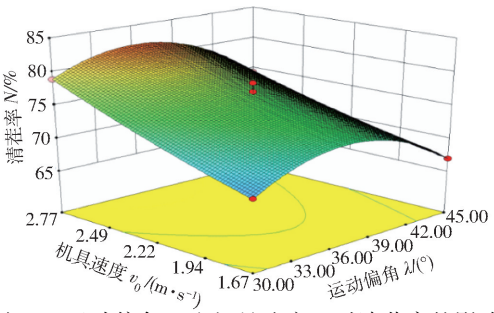


图 19 运动偏角 λ 和机具速度 v_0 对清茬率的影响

Fig. 19 Effects of angles of motion and speed on quantity of cleaning rate of backfill

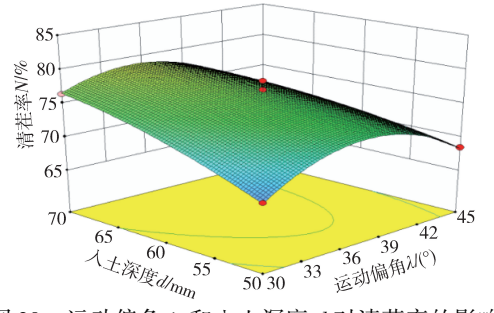


图 20 运动偏角 λ 和入土深度 d 对清茬率的影响

Fig. 20 Effects of angles of motion and soil contacting depth on quantity of cleaning rate of backfill

由式(10)和图 21 可知当运动偏角 λ 固定时机具速度 v_0 和入土深度 d 对清茬率均有显著性影响，且机具速度 v_0 的影响更加显著；随机具速度 v_0 的增大清茬率也随之增大；随着入土深度 d 的增大，清茬率也随之增大；机具速度 v_0 和入土深度 d 之间没有交互作用。

在试验结果回归分析和拟合的基础上，推荐最佳工作参数组合为：运动偏角 λ 为 37.5°、机具速度 v_0 为 2.77 m/s、入土深度 d 为 70 mm。

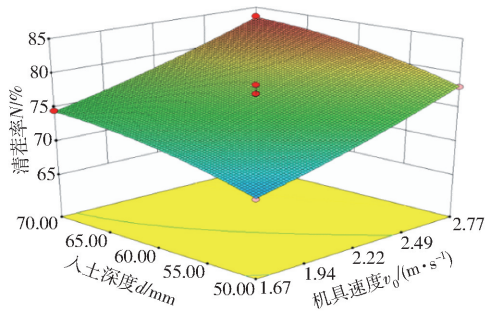


图 21 机具速度 v_0 和入土深度 d 对清茬率的影响

Fig. 21 Effects of speed and soil contacting depth on quantity of cleaning rate of backfill

4 结论

(1)针对传统清茬机构存在的种床清理不彻底的问题，设计了爪式凹面清茬轮，其凹面结构可以增大对秸秆的侧推速度，在秸秆全覆盖模式下进行种床清理作业时，清茬效果好、防堵能力强，适用于东北地区玉米均匀垄耕作模式及玉米宽窄行种植模式。

(2)采用离散元法构建了传统平面清茬轮和凹面清茬轮与土壤和秸秆的系统模型，分析了两种清茬轮清茬作业情况，并进行了仿真分析，研究表明：在同一条件下，本文所设计的凹面清茬轮翻抛秸秆时，秸秆翻抛速度加快，作业效果更好。

(3)根据 Design-Expert 软件中 Box - Behnken Design 组合设计原理，进行田间正交试验并对试验数据优化分析，得出凹面清茬机构最佳工作参数组合为：运动偏角 λ 为 37.5°、机具速度 v_0 为 2.77 m/s、入土深度 d 为 70 mm。本文所设计的凹面爪式清茬机构，在秸秆全覆盖条件下作业，种床内秸秆清茬率最高可达到 83.61%。

参 考 文 献

1 宋日，吴春胜，牟金明，等. 玉米根茬留田对土壤微生物量碳和酶活性动态变化特征的影响[J]. 应用生态学报，2002，13(3)：303 - 306.
SONG Ri，WU Chunsheng，MOU Jinming，et al. Effects of maize remaining in field on dynamics of soil microbial biomass C and enzyme activities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2002，13(3)：303 - 306. (in Chinese)

2 赵举，刘忠，黄斌. 玉米留茬免耕保护性耕作技术规程[J]. 内蒙古农业科技，2011(4)：91.

3 刘武仁，郑金玉，罗洋，等. 玉米宽窄行种植技术的研究[J]. 吉林农业科学，2007，32(2)：8 - 10.
LIU Wuren，ZHENG Jinyu，LUO Yang，et al. Research on planting technique with wide/narrow row alternation for maize[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences，2007，32(2)：8 - 10. (in Chinese)

4 COOKSON W R，MURPHY D V，ROPER M M. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry，2008，40(3)：763 - 777.

5 赵佳乐，贾洪雷，郭明卓，等. 免耕播种机有支撑滚切式防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2014，30(10)：20 - 26.
ZHAO Jiale，JIA Honglei，GUO Mingzhuo，et al. Design and experiment of supported roll-cutting[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(10)：20 - 26. (in Chinese)

6 廖庆喜，高焕文，舒彩霞，等. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报，2004，20(1)：108 - 112.
LIAO Qingxi，GAO Huanwen，SHU Caixia，et al. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE，2004，20(1)：108 - 112. (in Chinese)

7 高焕文，李洪文，姚宗路，等. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报，2008，39(4)：78 - 82.
GAO Huanwen，LI Hongwen，YAO Zonglu，et al. Study on the Chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese

Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 78 - 82. (in Chinese)
8 王汉羊, 陈海涛, 纪文义,等. 麦茬地免耕播种机清秸覆秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊2): 7 - 12.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi, et al. Design and experiment of cleaning and covering mechanism for no-till seeder in wheat stubble fields [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 2): 7 - 12. (in Chinese)
9 LANHAM R J. Tillage implement: US, 4716971[P]. 1988 - 05 - 01.
10 马洪亮, 魏淑艳. 一年两熟地区玉米秸秆根茬处理和小麦免耕作业方式的分析[J]. 中国农机化学报, 2012,33(1): 60 - 64.
MA Hongliang, WEI Shuyan. Analysis of the dealing with maize residue and the mode of no-till drilling wheat in double-crop regions in North China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012,33(1): 60 - 64. (in Chinese)
11 SMITH D R, MAENLE W C. Ground driven row cleaning apparatus: US, 5704430[P]. 1998 - 01 - 06.
12 FREED B E. Crop residue clearing device: US, US8393407[P]. 2013 - 03 - 12.
13 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 117 - 122.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on concave disc type maize ridge-till and no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 117 - 122. (in Chinese)
14 范旭辉, 贾洪雷, 张伟汉,等. 免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 56 - 60.
FAN Xuhui, JIA Honglei, ZHANG Weihan, et al. Parametric analysis of finger-type anti-blocking residue-cleaner for no-till planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 56 - 60. (in Chinese)
15 刘正平, 田梦, 杨淞旭, 等. 从动型旋转齿盘分草装置的设计[J]. 华南农业大学学报,2018,39(1): 120 - 124.
LIU Zhengping, TIAN Meng, YANG Songxu, et al. Design of a grass separation equipment with driven rotating tooth disk[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(1): 120 - 124. (in Chinese)
16 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, 2007:272 - 273,382.
17 胡瑞谦. 质点在绕水平轴等速旋转平面型叶片上运动的分析[J]. 农业机械学报,1980,11(4):62 - 72.
HU Ruiqian. Analysis of particle motion on a flat blade rotating at a constant speed around a horizontal axis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1980,11(4):62 - 72. (in Chinese)
18 王庆杰, 何进, 李洪文,等. 免耕播种机开沟防堵单体设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(1):27 - 31.
WANG Qingjie, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on furrowing and anti-blocking unit for no-tillplanter[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(1):27 - 31. (in Chinese)
19 林静,钱巍,牛金亮. 玉米垄作免耕播种机新型切拨防堵装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2015,46(6):691 - 698.
LIN Jing, QIAN Wei, NIU Jinliang. Design and test of a new type of cutting and anti-blocking device for corn ridge no-tillage planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015,46(6):691 - 698. (in Chinese)
20 姚宗路, 高焕文, 李洪文,等. 一年两熟区玉米覆盖地小麦免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(8):57 - 61.
YAO Zonglu, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experiment on no-till wheat planter under the bestrow of the maizestubble in double cropping area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 57 - 61. (in Chinese)