doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.010

弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化

史乃煜　陈海涛　王　星　柴誉铎　王洪飞　侯守印
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为解决 2BMFJ 系列玉米免耕播种机清秸装置侧向抛撒残茬时,清秸工作部件残茬回带和动土量较大问题,设计了一种弹齿式清秸装置防止残茬回带机构,通过理论分析确定关键部件主要结构参数,应用三因素三水平正交试验法,以机具作业速度、清秸弹齿与带轮圆周外法线方向后偏角和主动带轮转速为试验因素,以残茬清除率和残茬回带率为评价指标,对影响清秸装置性能的结构与作业参数进行试验与优化研究,试验结果表明:在机具作业速度 2.0 m/s,弹齿与带轮圆周外法线方向后偏角 30°,主动带轮转速 450 r/min 时,残茬清除率 95.5%、残茬回带率 1.38%。该机构在保证作业幅内残茬清除质量的同时,可有效减少残茬回带,为 2BMFJ 系列原茬地免耕播种机高质量种床准备、提高防堵性能提供了技术支撑。

关键词: 玉米; 免耕播种机; 清秸装置; 残茬回带; 弹齿
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)04-0084-08

Design and Experiment Optimization of Prevent Bring Back Stubble Mechanism of Spring-tooth Type Cleaning Device

SHI Naiyu　CHEN Haitao　WANG Xing　CHAI Yuduo　WANG Hongfei　HOU Shouyin
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: The 2BMFJ series of precision seeder for no-tillage mulch straw in stubble field developed by Northeast Agricultural University integrated seed bed preparation, stubble prevention, precision seeding, deep fertilization, covering and compacting soil, spraying potions, covering straw evenly and other functions, the original stubble field with high quality and precision seeding operations was completed. It has become an important technical means to ensure the combination of intensive cultivation and conservation tillage. In order to solve the problem of large amount of straw return during the operation of the spring-tooth cleaning plant, it was of great significance to study a kind of prevent bring back stubble mechanism. Therefore, based on the existing stubble no-tillage mulch straw precision seeder spring-tooth cleaning device, the prevent bring back stubble linkage mechanism was added. By modeling and analyzing the lateral throwing residual of the linkage mechanism, the change rule of rear deviation angle in the direction of outer normal line of the pulley was determined. The minimum rotational speed of the drive pulley was obtained by theoretical analysis of the stubble conveying with spring-tooth. Based on the theoretical analysis of soil cutting length, the structural parameters between the spring-tooth were obtained. In order to obtain rules of the spring-tooth on the residual stubble, the structural parameters of the prevent bring back stubble linkage mechanism were determined. The experiment was carried out by using the method of $L_9(3^4)$ orthogonal test. The working speed, deflection of spring-tooth and rotational speed of drive pulley were selected. The rate of straw removal and the rate of straw return were taken as the evaluation indexes. The results showed that the working speed and the rotational speed of drive pulley had an extreme significant effect on the straw removal rate of seed bed ($P < 0.01$). The effect of the angle on the straw return rate was significant ($0.01 < P < 0.05$). The optimum parameters were as follows: the working speed was 2.0 m/s, the angle was 30°, and the rotational speed of drive pulley was 450 r/min. The straw removal rate of the bed was 95.5% and the straw return rate was 1.38%. Based

收稿日期: 2018-09-10　修回日期: 2018-10-24
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(GARS-04)和国家重点研发计划项目(2018YFD0201004)
作者简介: 史乃煜(1993—),男,博士生,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 269029820@qq.com
通信作者: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

on this, the structural parameters of the prevent bring back stubble mechanism bands were calculated by using Maple 18 software, which was 80 mm and 160 mm. The prevent bring back stubble mechanism improved the applicability of 2BMFJ series projectile no-tillage planter, and provided equipment and technical support for the comprehensive popularization and application of conservation tillage technology.
Key words: corn; no-tillage planter; stubble cleaning device; bring back of stubble; spring-tooth

0　引言

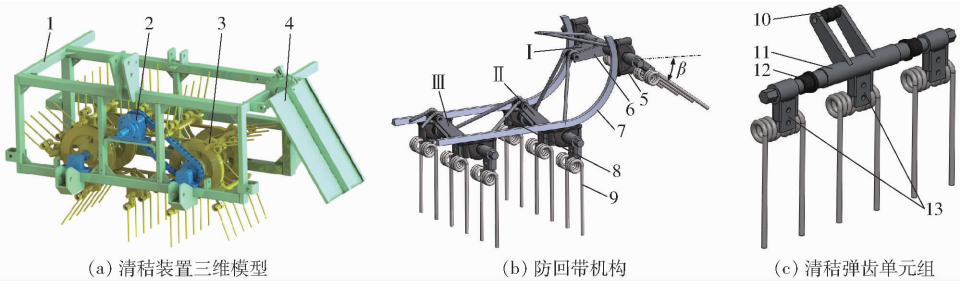
目前,国外免耕播种机大部分为大型牵引式联合作业,普遍采用被动防堵技术完成作业,依靠机具质量强行破茬入土[1]。其中,FALLAHI 等[2]通过试验比较不同类型开沟圆盘性能,得出平面圆盘开沟播种深度一致性最佳。AHMAD 等[3]针对双圆盘开沟器破茬性能开展研究,得到双圆盘开沟器直径 450 mm 时破茬率最优。对于我国地表有大量残茬覆盖的地区,被动防堵技术很难解决作业时残茬堵塞问题,因此残茬的处理必须采用动力驱动式防堵技术,国内学者对此开展大量研究。其中,赵宏波等[4]设计了一种条带式旋切后抛防堵装置,应用正交试验与有限元软件仿真确定了旋切刀和开沟器等关键结构和作业参数,在保证防堵性能的同时降低了作业功耗。王韦韦等[5]针对玉米免耕播种机设计了一种主动式秸秆移位防堵装置,解决了传统玉米免耕播种在秸秆全覆盖地作业过程中出现开沟器壅堵、架种和晾种等问题。卢彩云等[6]设计了一种浮动支撑防堵装置,与带状旋耕防堵装置相比,土壤扰动量减少约 25%,油耗降低约 7.04%。陈海涛等[7-8]研发的 2BMFJ 系列免耕播种机,由拖拉机动力输出轴提供动力,利用侧向抛出残茬方式,将残茬均匀覆盖于已播地表面,其中弹齿式清秸装置相比于同系列刚齿式清秸装置,具有动土量小、过载保护等优点。但在侧向抛撒残茬时,工作部件会将部分残茬回带到整备后的种床,积累后易造成播种单体堵塞,影响正常播种[9-14]。因此,在原茬地免耕覆秸精量播种机弹齿式清秸装置基础上,增设一种防止残茬回带(以下简称防回带)机构具有重要的现实意义。

针对上述问题,设计一种适用于玉米原茬地弹齿式清秸防堵种床整备装置的防回带机构,通过理论分析确定关键部件的主要参数,同时应用正交试验优化得到该机构最优参数组合,提高 2BMFJ 系列弹齿式免耕播种机适用性,为精准播种施肥奠定基础。

1　清秸装置防回带机构设计

1.1　清秸装置总体结构与工作原理

2BMFJ 系列免耕播种机弹齿式清秸装置主要由机架、传动总成、清秸总成和残茬抛撒调控装置 4 部分构成,如图 1a 所示。



(a) 清秸装置三维模型　　(b) 防回带机构　　(c) 清秸弹齿单元组

图 1　弹齿式清秸装置结构图

Fig. 1　Structure diagrams of spring-tooth stubble cleaning device

1. 机架　2. 传动总成　3. 清秸总成　4. 残茬抛撒调控装置　5. 弹齿轴铰接座　6. 清秸弹齿单元组　7. 传动带　8. 弹齿角度调节杆　9. 弹齿　10. 轴套 A　11. 弹齿连接轴　12. 轴套 B　13. 弹齿固定座　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ. 清秸弹齿单元组

清秸装置作业时,由拖拉机动力输出轴提供动力,经由传动总成带动主动带轮转动,清秸弹齿等间距布置在传动带外侧,随传动带一同运动,对原茬地残茬进行侧向水平输送、抛撒至机具侧面,均匀覆盖于已播地表面,其传动总成系统如图 2 所示。

弹齿是清秸装置关键部件,弹齿与带轮圆周外法线方向后偏角 β(以下简称后偏角)和主动带轮转速 n(以下简称转速)直接影响残茬回带,回带到种床的残茬会堵塞施肥播种单体,影响正常播种[15-17]。

防回带机构如图 1b 所示,它由清秸弹齿单元组、传动带和弹齿角度调节杆组成,清秸弹齿单元组与弹齿轴铰接座铰链并等间距固定在传动带外侧,弹齿角度调节杆分别与相邻两清秸弹齿单元组Ⅱ、Ⅲ上部和中部铰链,当传动带带动清秸弹齿单元组Ⅱ、Ⅲ对残茬实施水平输送作业时,弹齿角度调节杆、清秸弹齿单元组Ⅱ上部与两清秸弹齿组Ⅱ、Ⅲ间传动带形成稳定的“三角形”结构,此时弹齿指向重

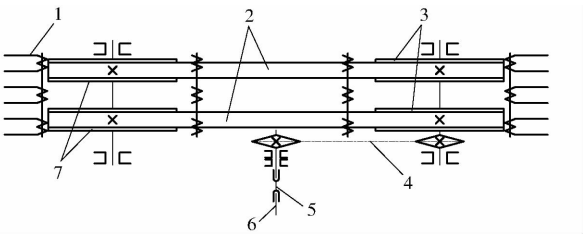


图 2 传动总成系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of transmission assembly system

1. 弹齿 2. 传动带 3. 主动带轮 4. 传动链 5. 万向节联轴器 6. 拖拉机动力输出轴 7. 从动带轮

力方向。当清秸弹齿单元组Ⅰ随带轮做圆周运动，对残茬实施侧向抛撒作业时，由于传动带弯曲，致使相邻两清秸弹齿单元组Ⅰ、Ⅱ空间距离变短，在弹齿角度调节杆推动下，弹齿单元组Ⅰ绕轴旋转，后偏角 β 变大，有效减少残茬回带，从而在原茬地上整备出良好的种床。

1.2 防回带机构参数确定

1.2.1 侧向抛撒残茬运动分析

首先以两组弹齿间杆组为研究对象，分析在该机构作用下，后偏角变化情况。如图 3 所示，弹齿随传动带运动至位置 B 时，对残茬实施侧向抛撒作业，此时弹齿绕带轮回转中心 O 做匀速圆周运动，其相邻下一组弹齿在 D 处由传动带带动做匀速直线运动，对种床上残茬进行水平输送作业。

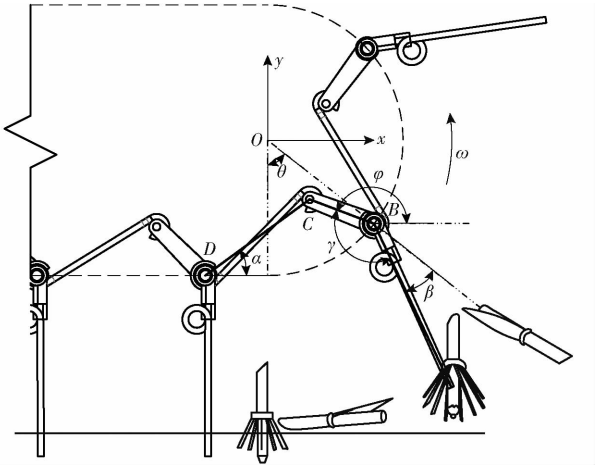


图 3 抛撒残茬示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of throwing straw

对杆组作模型简化分析，建立如图 4 所示平面直角坐标系，坐标原点 O 为主动带轮回转中心，x 轴正方向与工作弹齿运动方向相同，y 轴正方向与重力方向相反。其铰链点 C 矢量方程为

$$\boldsymbol{r}_{OC}=\boldsymbol{r}_{OB}+\boldsymbol{l}_{BC}=\boldsymbol{r}_{OD}+\boldsymbol{l}_{DC} \tag{1}$$

铰链点 C 在 x、y 轴上投影，得到位置方程

$$\begin{cases}x_C=x_B+l_{BC}\cos\varphi=x_D+l_{DC}\cos\alpha\\ y_C=y_B+l_{BC}\sin\varphi=y_D+l_{DC}\sin\alpha\end{cases} \tag{2}$$

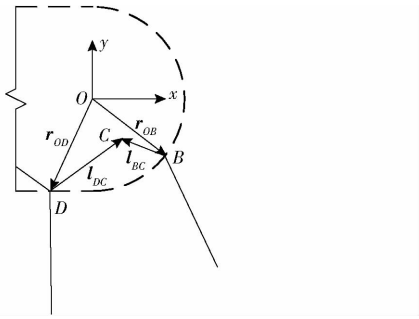


图 4 机构矢量图

Fig. 4 Drawing of institution's vector

其中

$$\begin{cases}x_B=R\sin\theta\\ y_B=-R\cos\theta\\ x_D=R\dfrac{\theta}{180}-l\\ y_D=-R\end{cases} \tag{3}$$

式中 (x_B,y_B)——铰链点 B 坐标值，mm

(x_C,y_C)——铰链点 C 坐标值，mm

(x_D,y_D)——铰链点 D 坐标值，mm

φ——BC 连杆与 x 轴正方向夹角，(°)

α——DC 连杆与 x 轴正方向夹角，(°)

θ——OB 与 y 轴负方向夹角，(°)

R——带轮回转半径，mm

l——弹齿组间距，mm

由式(2)得

$$\varphi=2\arctan\frac{B_0-\sqrt{A_0^2+B_0^2-C_0^2}}{A_0+C_0} \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases}\varphi=\dfrac{3\pi}{2}+\theta-\gamma-\beta\\ \gamma=\arccos\dfrac{l_{BC}^2+l^2-l_{DC}^2}{2l_{BC}l}+\dfrac{\pi}{2}\\ A_0=2l_{BC}(x_D-x_B)\\ B_0=2l_{BC}(y_D-y_B)\\ C_0=l_{BC}^2+l_{BD}^2-l_{DC}^2\\ l_{BD}=\sqrt{(x_D-x_B)^2+(y_D-y_B)^2}\end{cases} \tag{5}$$

为保证机构装配，必须同时满足 $l_{BD}<l_{BC}+l_{DC}$ 和 $l_{BD}>l_{DC}-l_{BC}$。

由式(4)、(5)得到后偏角 β 随 OB 与 y 轴负方向夹角 θ 变化关系：受防回带连杆机构影响，后偏角 β 随 θ 增加而增加。

当相邻两弹齿组 B、C 均绕回转中心 O 做匀速圆周运动时，如图 5 所示，弹齿组间距离 l_{BD} 保持不变，后偏角 β 随 θ 增加保持不变。

分析得出，当弹齿开始对残茬进行侧向抛撒作业时，在防回带连杆机构作用下，后偏角 β 随 θ 变化先增加后保持不变，该最大后偏角 $\beta_{\max}$ 为

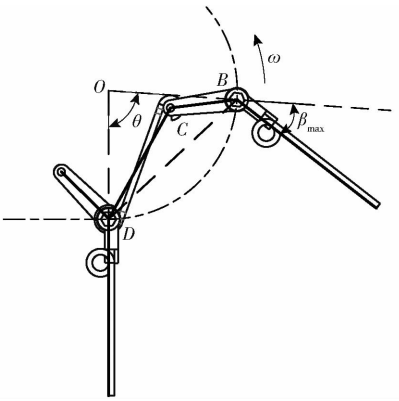


图 5　弹齿运动状态分析图

Fig. 5　Motion status analysis diagram of spring-tooth

$$\beta_{\max}=\arccos\frac{l_{BD}^2+l_{BC}^2-l_{CD}^2}{2l_{BD}l_{BC}}+\frac{90l}{\pi R}-\arccos\frac{l_{BC}^2+l^2-l_{CD}^2}{2l_{BC}l} \tag{6}$$

1.2.2　水平输送残茬运动分析

当清秸弹齿单元组从圆周运动转换为水平方向运动，开始对残茬进行水平输送作业时，如图 6 所示，由于弹齿单元组Ⅱ和弹齿角度调节杆Ⅲ共同作用，Ⅰ处弹齿会产生后偏角 β，若该偏转角过大，弹齿端部 A 无法及时接触种床，致使部分区域内残茬无法清理，影响后续施肥播种作业。

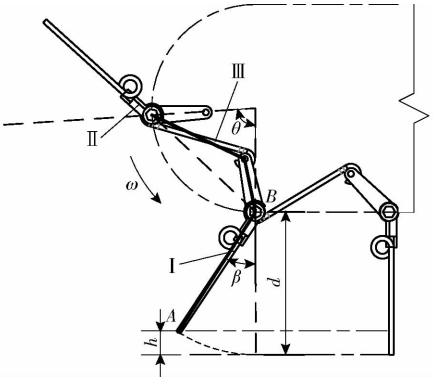


图 6　弹齿开始输送残茬运动分析图

Fig. 6　Motion analysis diagram of spring-tooth start conveying straw

为保证免耕播种机清秸装置作业质量，将后偏角 β 控制在一定范围内，有

$$d-d\cos\beta=h\leqslant h_{\min} \tag{7}$$

式中　d——弹齿端部 A 与弹齿单元组回转中心 B 的距离，mm

h——弹齿后偏角造成的重力方向滞后高度，mm

$h_{\min}$——保证清秸质量的理论最小入土深度，mm

通过对弹齿弹性变形分析和基础试验确定 d 为 200 mm；为保证清秸质量，弹齿入土深度要大于玉米根茬主根深度[18-19]，针对玉米根茬特性，设定弹齿最小入土深度 $h_{\min}=50$ mm，入土深度 h 与最大后偏角 $\beta_{\max}$ 关系为

$$\beta_{\max}\leqslant\arccos\frac{d-h}{d} \tag{8}$$

弹齿对残茬进行水平输送作业时，弹齿绝对速度 v_a 由拖拉机前进方向速度 v_e（以下简称作业速度）和弹齿横向线速度 v_r 共同决定，由图 7 可知，为确保残茬清出种床，当机具前进距离为纵向宽度 S 时，需保证弹齿相对机架侧向移动距离 $(k-1)L$，即

$$\frac{S}{v_e}=\frac{(k-1)L}{v_r} \tag{9}$$

其中

$$v_r=\frac{\pi n(R+d)}{30\,000} \tag{10}$$

式中　L——垄距，mm

k——清秸装置一次作业行数

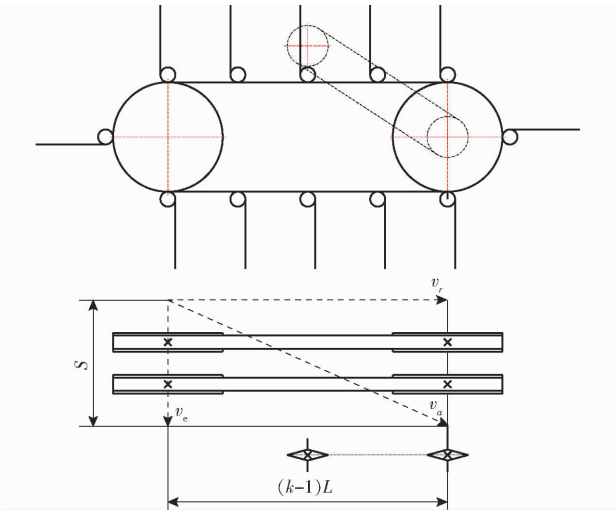


图 7　清秸装置整体布置示意图

Fig. 7　Schematic diagram of overall arrangement of straw cleaning device

清秸装置纵向有效清秸宽度 S 过大会加长播种机整体长度，影响纵向稳定性，过小不能保证清秸效果，综合考虑选定 400 mm；为保证防回带机构合理布置，取带轮回转半径 200 mm；由机械排种器特性得到免耕播种机常规作业速度为 2.0 m/s。

当清秸装置纵向有效清秸宽度和横向有效清秸长度一定时，清秸装置转速为

$$n\geqslant\frac{30\,000(k-1)Lv_e}{\pi S(R+d)} \tag{11}$$

1.2.3　切土节距分析和相关参数确定

弹齿对土壤清扫痕迹间法向距离即为切土节距，切土节距是影响清秸装置作业质量的重要指标。节距过大导致部分残茬无法清理出种床，过小则会增加机具能耗[20]，因此要求清秸装置具有均匀切土节距。玉米根茬直径在 19 ~ 31 mm 之间[21-22]，为

保证清秸效果,设计理论切土节距为 15 mm。

理论切土节距与转速 n、作业速度 v_e、弹齿组间距 l 和每组弹齿根数 N_1 等有关,弹齿工作状态如图 8 所示。

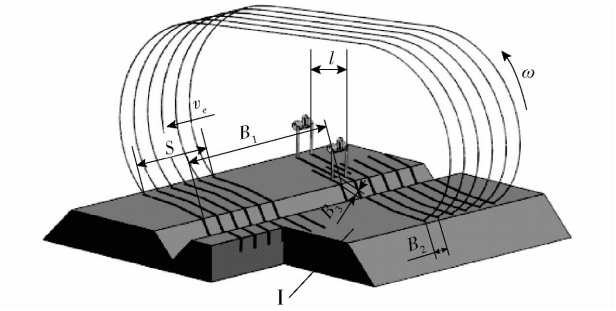


图 8 清秸装置弹齿的工作状态

Fig. 8 Working state of spring-tooth

弹齿随传动带运动一周,单根弹齿理论切土节距为

$$B_1 = \frac{60\,000[\pi R + \pi d + (k-1)L]v_e}{\pi n(R+l)} \tag{12}$$

考虑每组 N_1 根弹齿共同作用,每组弹齿理论最小切土节距为

$$B_2 = \frac{S}{N_1 - 1} \tag{13}$$

不同弹齿组间弹齿理论最小切土节距为

$$B_3 = \frac{v_e l}{v_r} \tag{14}$$

弹齿最终切土节距由 B_1、B_2、B_3 共同决定,且 $B_1 > B_2 > B_3$,当单根弹齿理论切土节距 B_1 大于清秸装置纵向有效清秸宽度 S 时,图 8 的Ⅰ区域残茬无法被清理,此时需多组弹齿对该漏清区域进行残茬清理。

每组弹齿最小切土节距 B_2 由每组弹齿根数 N_1 决定,设计其为理论切土节距整数倍,得到清秸装置每组弹齿理论最优数量为均布 6 根,通过式(13)求得每组弹齿理论最小切土节距 B_2 为 80 mm,是最小切土节距的 5 倍。对应弹齿组间距 l 计算式为

$$l = \frac{16\xi v_r}{v_e} \tag{15}$$

式中 ξ——节距系数,根据实际需要取 1、2、3、4

为保证弹齿组均布在传动带外侧,l 满足条件

$$l = \frac{2[\pi R + (k-1)L]}{N_2} \tag{16}$$

式中 N_2——传动带外侧均布弹齿组个数,根据实际需要取自然数

综合考虑式(7)~(16),得到弹齿式清秸装置部分结构和作业参数 $l = 213$ mm,$\beta_{max} \leqslant 41.4°$。

2 行清秸装置与 3 行清秸装置主动带轮最低转速分别为 97、194 r/min,当作业行数大于 3 行时,采取两侧抛出方式。考虑安全系数,最终确定最低转速为 250 r/min。

2 试验条件与方法

2.1 试验条件与仪器

试验于 2017 年 11 月 9 日在东北农业大学农学院试验田进行,试验地为垄距 650 mm 玉米地,秸秆人工收割后粉碎还田,残茬覆盖量 1.9 kg/m^2,平均土壤硬度 27.6 kg/m^2,平均土壤含水率 19.5%,选用约翰迪尔 280 型拖拉机为试验装置提供配套动力。

试验仪器:卷尺(量程 5 m,精度 1 mm);直尺(量程 20 cm,精度 1 mm);非接触式转速测量仪(量程 9 999 r/min,精度 1 r/min);电子秤(量程 30 kg,精度 0.01 kg);TZS-1 型土壤水分测定仪;TYD-2 型土壤硬度计;数码相机。

2.2 试验设计与方法

应用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法,选取作业速度、后偏角和转速为试验因素,残茬清除率和残茬回带率为评价指标,应用 Design-Expert 8.0 软件对试验数据进行处理分析。为简化试验装置,选取 β_{max} 为弹齿后偏角,简化后试验装置如图 9 所示。

图 9 田间试验

Fig. 9 Field test

结合清秸装置结构参数和前期预试验,由式(8)计算得到后偏角范围 0°~41.4°;通过式(11)得到最低转速 250 r/min,根据生产实际经验,转速过快会加剧机体震动,影响作业稳定性与可靠性,因此在保证清秸装置作业质量前提下,应尽量降低转速,试验时,根据作业速度确定拖拉机挡位和油门后,使用转速测量仪测量拖拉机动力输出轴转速,通过调整链传动比得到所需水平;免耕播种机作业速度过快导致配套排种器播种合格指数下降,过慢则降低播种机作业效率,综合考虑选取作业速度1.5~2.5 m/s。最终确定各试验因素水平如表 1 所示,试验方案如表 2 所示。评价指标包括残茬回带率和残茬清除率。

清秸装置作业后,残茬被抛撒到机具前进方向左侧,因此在播种带两侧,取长度相等两段区域,分

表 1　正交试验因素水平

Tab. 1　Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	作业速度 X_1/(m·s^{-1})	后偏角 X_2/(°)	转速 X_3/(r·min^{-1})
1	1.5	10	250
2	2.0	20	350
3	2.5	30	450

别测量清秸装置作业后残茬增加质量,计算得到残茬回带率

$$Y_1 = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_1 + \Delta m_2} \times 100\% \tag{17}$$

式中　Δm_1——清秸装置作业后右侧残茬增加的质量,kg

Δm_2——清秸装置作业后左侧残茬增加的质量,kg

在播种完的种床上,利用五点取样法进行取样,取清秸前、后单位面积残茬质量 G_1、G_2,残茬清除率为

$$Y_2 = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100\% \tag{18}$$

3　试验结果与分析

3.1　试验结果极差分析

试验结果与极差分析如表 2 所示。A、B、C 分别为作业速度、后偏角、转速的水平值。

对于残茬清除率,影响主次顺序为 C、A、B,优化组合 $A_1B_2C_3$,即作业速度 1.5 m/s,后偏角 20°,转速 450 r/min;对于残茬回带率,影响主次顺序为 B、C、A,优化组合 $A_2B_3C_3$,即作业速度 2.0 m/s,后偏角 30°,转速 450 r/min。

二者优化结果并不完全相同,需要进一步优选,综合比较两优化结果,共同确定因素 C 最优水平为 C_3;考虑到作业速度决定作业效率,在保证作业质量时应提高作业速度,因素 A 中水平 A_1、A_2 对应作业质量均满足要求,因此优选 A_2 为最优水平;因素 B 对指标 Y_1 极差为 7.0、对指标 Y_2 极差为 0.7,因此由指标 Y_2 确定因素 B 最优水平为 B_3。

综上,通过极差分析得出优化因素组合:作业速度不大于 2.0 m/s,后偏角 30°,转速 450 r/min。

3.2　试验结果方差分析

对试验结果进行方差分析,结果如表 3 所示。

对于残茬清除率,作业速度和转速对其影响极显著($P < 0.01$),后偏角对其影响不显著($P > 0.01$),这是因为残茬清除率主要由单位时间内清秸装置秸秆排出量和秸秆摄入量共同决定,秸秆摄入量与作业速度正相关,秸秆排出量与转速正相关,只有当秸秆排出量大于秸秆摄入量时,才能保证作业效果,因此作业速度和转速对残茬清除率影响极显著。

对于残茬回带率,后偏角对其影响显著($P < 0.05$),作业速度和转速对其影响不显著($P > 0.05$),这是因为后偏角决定残茬抛出方向,后偏角越大,残茬抛出速度竖直分量越小,残茬回带率随之减小。

表 2　试验结果与极差分析

Tab. 2　Test results and range analysis

试验号		因素				指标	
		A	B	C	空列	残茬回带率 Y_1/%	残茬清除率 Y_2/%
1		1	1	1	1	9.4	92.7
2		1	2	2	2	5.9	95.6
3		1	3	3	3	0.8	96.4
4		2	1	2	3	8.5	94.7
5		2	2	3	1	3.3	97.2
6		2	3	1	2	2.1	91.7
7		3	1	3	2	7.8	93.4
8		3	2	1	3	8.3	88.3
9		3	3	2	1	1.7	90.5
Y_1	k_{11}	5.4	8.6	6.6			
	k_{12}	4.6	5.8	5.4			
	k_{13}	5.9	1.5	4.0			
	R	1.3	7.0	2.6			
	因素主次	B、C、A					
	优化组合	$A_2B_3C_3$					
Y_2	k_{11}	94.9	93.6	90.9			
	k_{12}	94.5	93.7	93.6			
	k_{13}	90.7	92.9	95.7			
	R	4.2	0.7	4.8			
	因素主次	C、A、B					
	优化组合	$A_1B_2C_3$					

表 3　方差分析结果

Tab. 3　Results of variance analysis

指标	来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
残茬清除率	A	31.94	2	15.97	103.39	0.009 6
	B	1.24	2	0.62	4.02	0.199 1
	C	34.28	2	17.14	110.99	0.008 9
	误差	0.31	2	0.15		
	总和	67.77	8			
残茬回带率	A	2.60	2	1.30	2.69	0.271 3
	B	81.62	2	40.81	84.24	0.011 7
	C	12.71	2	6.35	13.12	0.070 8
	误差	0.97	2	0.48		
	总和	97.90	8			

3.3　最优参数确定

综合考虑各因素对残茬清除率和残茬回带率两指标影响,以保障清秸质量、减少残茬回带、提高作

业效率为目标,对试验结果进行优化,得到的两个优化结果如表 4 所示。

表 4 优化试验结果

Tab. 4 Results of optimization test

序号	作业速度 X_1/(m·s^{-1})	后偏角 X_2/(°)	转速 X_3/(r·min^{-1})	残茬清除率/%	残茬回带率/%
1	1.5	30	450	97.2	1.53
2	2.0	30	450	96.8	1.53

优化结果 1 比优化结果 2 的残茬清除率高 0.4 个百分点,但考虑到作业效率,选择方案 2 作为最优参数组合,即:作业速度 2.0 m/s,后偏角 30°,转速 450 r/min,此时残茬清除率 96.8%,残茬回带率 1.53%。与极差分析优化结果相吻合。

按此优化结果进行验证试验,重复 5 次取平均值,结果为:残茬清除率 95.5%,残茬回带率 1.38%。由验证试验结果可知,最优参数组合下,试验结果与优化结果相符,优化结果可信。

为确定防回带连杆机构结构参数,利用 Maple 18 软件对式(6)进行数值求解,以连杆长度 l_{BC} 和 l_{CD} 为变量,根据试验结果,最优作业参数为后偏角 30°,设定边界条件

$$\begin{cases}\beta|_{\theta=0}=0\\ \beta|_{\theta=\frac{180l}{\pi R}}=30\end{cases} \tag{19}$$

计算得出连杆长度 l_{BC} 和 l_{CD} 分别为 80、160 mm,即防回带连杆机构最优结构参数。

4 结论

(1)所设计的玉米原茬地弹齿式清秸装置防回带机构,在保证作业幅内残茬清除质量的同时,可有效减少残茬回带,为 2BMFJ 系列原茬地免耕播种机高质量种床整备、提高防堵性能提供了技术支撑。

(2)加装防止残茬回带机构的 2BMFJ 系列免耕播种机弹齿式清秸装置,在土壤硬度 27.6 kg/cm^2、土壤含水率 19.5%、残茬覆盖量 1.9 kg/m^2 玉米原茬地上,当参数组合为作业速度 2.0 m/s、后偏角 30°、转速 450 r/min 时,残茬清除率 95.5%,残茬回带率 1.38%。

参 考 文 献

[1] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[2] FALLAHI S, RAPUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil &Tillage Research, 2008, 98(1): 27 - 34.

[3] AHMAD F, DING W, DING Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil[J]. Plos One, 2015, 10(3): e0119648.

[4] 赵宏波,何进,李洪文,等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):65 - 75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65 - 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180508&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)

[5] 王韦韦,朱存玺,陈黎卿,等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(24):10 - 17.
WANG Weiwei, ZHU Cunxi, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 10 - 17. (in Chinese)

[6] 卢彩云,李洪文,何进,等. 小麦免耕播种机浮动支撑式防堵装置[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):52 - 55,153.
LU Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, et al. Floated support anti-blocking device of wheat no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 52 - 55, 153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.009. (in Chinese)

[7] 陈海涛,纪文义,王汉羊,等. 定轴刚齿式茬地种床整备装置. CN102415233A[P]. 2012 - 04 - 18.

[8] 纪文义,陈海涛,王汉羊,等. 弹齿式茬地免耕清秸覆秸条播机. CN202232055U[P]. 2012 - 05 - 30.

[9] 何进,李洪文,王庆杰,等. 动力甩刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(10):51 - 55,67.
HE Jin, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Powered blade no-till wheat seeder for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 51 - 55, 67. (in Chinese)

[10] 王庆杰,何进,李洪文,等. 免耕播种机开沟防堵单元体设计与试验[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 forno-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 27 - 31. (in Chinese)

[11] 苟文,马荣朝,杨文钰,等.小麦免耕播种机开沟器的设计[J].农业工程学报,2012,28(增刊):21 - 25.
GOU Wen, MA Rongchao, YANG Wenyu, et al. Design of opener on no-till wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(Supp.):21 - 25. (in Chinese)

[12] 朱惠斌,李洪文,何进,等.稻茬地双轴驱动防堵式小麦免耕播种机[J/OL].农业机械学报,2013,44(6):39 - 44.
ZHU Huibin, LI Hongwen, HE Jin, et al. No-till wheat seeder with two-axel drive anti-blocking in rice stubble field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(6):39 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130608&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.008. (in Chinese)

[13] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):96 - 102.
CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):96 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160714&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)

[14] 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.
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. 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. (in Chinese)

[15] 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 Wenying. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(9):43 - 48. (in Chinese)

[16] 林静,李宝筏,李宏哲.阿基米德螺线型破茬开沟和切拨防堵装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(17):10 - 19.
LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of Archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(17):10 - 19. (in Chinese)

[17] 林静,李博,李宝筏,等.阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(6):118 - 124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on Archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):118 - 124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140619&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019. (in Chinese)

[18] 潘茹京.玉米根茬和土壤相互作用的力学特性研究[D].长春:吉林大学,2012.
PAN Rujing. Study on mechanical properties of interaction of the corn stubble and soil[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)

[19] 顿国强. 大垄密植原茬地免耕精量播种机关键技术研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.
DUN Guoqiang. Key technology research of severe no-tillage precision seeder for a corn big ridge with original stubble[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2013. (in Chinese)

[20] 顿国强,陈海涛,李昂,等. 刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清秸单体性能的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(12):48 - 56.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, LI Ang, et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing straw unit performance for no-tillage and straw-mulching precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(12):48 - 56. (in Chinese)

[21] 陈争光,王德福,李利桥,等.玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J].农业工程学报,2012,28(21):59 - 65.
CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(21):59 - 65. (in Chinese)

[22] 曾百功. 玉米根茬收集装置研制及关键机构机理分析[D].长春:吉林大学,2013.
ZENG Baigong. Development of maize stubble harvesting machine and mechanism analysis of its key components[D]. Changchun: Jilin University,2013. (in Chinese)