

夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验

谢建华^{1,2} 吴仕花¹ 曹肆林^{1,3} 张毅^{1,2} 赵维松¹ 周金豹¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

摘要: 针对现有棉秆收获机械拔断率、漏拔率高, 作业时需对行等问题, 设计了一种夹持辊式棉秆拔取装置。该装置主要由棉秆拔取机构、棉秆输送机构组成, 通过对棉秆拔取机构作业过程进行运动学与动力学分析确定了各零部件的结构参数与工作参数。为了验证棉秆拔取装置工作的可靠性与作业性能, 以机具前进速度、上拔秆辊转速、机具前进速度与拔秆轮线速度比值(简称速比)作为试验因素, 棉秆拔断率、漏拔率为试验指标进行了三因素三水平二次回归响应面试验, 建立了回归模型, 分析了各因素对棉秆拔取装置作业性能的影响, 并进行了参数优化与试验验证。试验结果表明: 影响棉秆拔断率的因素主次顺序为上拔秆辊转速、机具前进速度、速比; 影响棉秆漏拔率的因素主次顺序为速比、机具前进速度、上拔秆辊转速。优化后的工作参数为: 机具前进速度 0.60 m/s、上拔秆辊转速 46 r/min、速比 0.50, 以此参数组合进行田间试验, 得到棉秆拔断率为 3.68%, 漏拔率为 5.19%, 与理论优化值相对误差不超过 5%, 研究结果可为棉秆拔取装置的设计提供参考。

关键词: 棉秆; 拔取; 夹持辊式

中图分类号: S225.91⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)05-0101-11

OSID:



Design and Test of Clamping-roller Cotton Stalk Pulling Device

XIE Jianhua^{1,2} WU Shihua¹ CAO Silin^{1,3} ZHANG Yi^{1,2} ZHAO Weisong¹ ZHOU Jinbao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: In response to the existing cotton stalk harvesting machinery has high breakage rate, high leakage rate, and the need of work on rows and other problems, a clamping-roller cotton stalk pulling device was designed. The device was mainly composed of cotton stalk pulling mechanism and cotton stalk conveying mechanism, and the structural parameters and working parameters of each component were determined through the kinematic and dynamics analysis of the operation process of the cotton stalk pulling mechanism. In order to verify the reliability and operational performance of the cotton stalk pulling device, a three-factors, three-levels quadratic regression orthogonal test was conducted with the forward speed of machine, the speed of upper stalk pulling roller, the ratio of forward speed of the machine to the linear speed of the stalk plucking wheel (referred to as the speed ratio) as the test factors, and the stalk breakage rate and the leakage rate as the test indexes. A regression model was established to analyze the influence of each factor on the operational performance of the cotton stalk pulling device, and parameter optimization and test verification were carried out. The test results showed that the factors affecting the stalk breakage rate in the main order was upper stalk roller speed, machine forward speed and speed ratio; the factors affecting the stalk leakage rate in the main order was speed ratio, machine forward speed and upper stalk roller speed. The optimized working parameters was as follows: machine forward speed of 0.60 m/s, upper stalk roller speed of 46 r/min and speed ratio of 0.50 for field test, the combination of these parameters was tested in the field, and the stalk breakage rate was 3.68%, and leakage rate was 5.19%, the relative error with the theoretical optimized value was not more than 5%, the research results can provide reference for the design of cotton stalk pulling device.

Key words: cotton stalk; pulling; clamping-roller type

收稿日期: 2022-08-15 修回日期: 2023-01-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B02033)

作者简介: 谢建华(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业固体废弃物回收机械装备研究, E-mail: xjh199032@163.com

0 引言

对棉秆进行整秆收获可改善由于棉秆粉碎还田造成的土壤环境问题,也是棉秆资源规模化利用的一种重要方式^[1-4]。整秆收获的棉秆不仅可以增加棉花种植户收入,还为棉秆的工业化利用提供了便利,在经济、能源方面具有多重效益^[5-8]。

国外的棉秆收获技术主要以对行收获为主,难以适应我国棉花种植行距不统一的复杂农艺要求^[9]。国内棉秆收获机械根据收获原理可以分为铲切式、齿盘式、带夹式、齿辊式等几种类型。贺小伟等^[8,10]设计的铲切式棉秆收获机收获棉秆时需要,对行,铲切后的棉秆需要推拔辊辅助完成棉秆整秆拔取,作业过程繁琐。陈明江等^[11]、张佳喜等^[12]设计的齿盘式棉秆收获机容易将棉秆切断,而且需要对行拔取,不适用于新疆地区宽窄行的棉花种植模式。张佳喜团队^[13-15]设计的带夹式棉秆收获机皮带夹持张紧力不足会出现棉秆漏拔现象,作业过程中容易发生雍堵,影响作业效果。唐遵峰等^[16]、张爱民等^[17]设计的齿辊式棉秆收获机在作业时容易缠绕地膜,机具拔秆辊容易被卡死,造成机具性能不稳定,能量消耗增加。

为解决棉秆拔断率、漏拔率高,机具在作业过程中需对行等问题,根据新疆地区一膜六行棉花种植模式以及棉秆“矮、密、细”的特点^[18],本文设计一种适用于自走式棉秆拔取与残膜回收联合作业机的夹持辊式棉秆拔取装置,制作样机并进行田间试验,验证机具作业性能。

1 夹持辊式棉秆拔取装置结构与工作原理

1.1 装置结构

夹持辊式棉秆拔取装置工作部件主要由拔取机构、输送机构和链传动系统组成,棉秆拔取机构具体包括拨秆轮、上拔秆辊、下拔秆辊,输送机构主要由输送链板、螺旋输送器等组成,装置结构如图1所示。

1.2 工作原理

夹持辊式棉秆拔取装置悬挂在自走式棉秆拔取与残膜回收联合作业机前方,动力经自走式棉秆拔取粉碎与残膜回收联合作业机发动机输出轴传递给拨秆轮,安装于拨秆轮上的拨秆杆将直立状态下的棉秆进行拨秆,当拨秆轮转动到拨秆杆与上拔秆辊凹槽配合的位置时,棉秆被夹持住,拨秆轮与上、下拔秆辊继续旋转,棉秆在拨秆杆与上、下拔秆辊之间被夹紧并随着机具前进逐渐被拔出地面。棉秆拔出后经棉秆输送机构喂入后方粉碎装置进行粉碎。

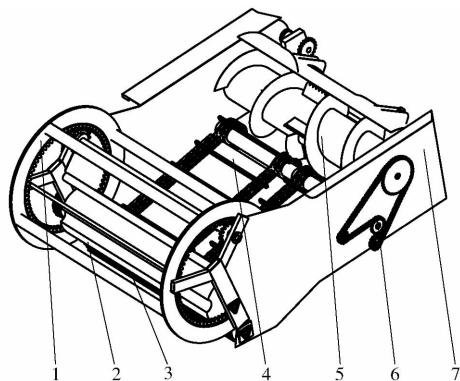


图1 夹持辊式棉秆拔取装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of clamping-roller cotton stalk pulling device

1. 拨秆轮 2. 上拔秆辊 3. 下拔秆辊 4. 输送链板 5. 螺旋输送器 6. 输送链条 7. 机架

2 主要部件设计

2.1 棉秆拔取机构

棉秆拔取机构是夹持辊式棉秆拔取装置的重要组成部分之一,作业性能将会影响棉秆整秆拔取收获的效果,其结构示意图如图2所示。棉秆拔取机构主要由拨秆轮、上拔秆辊、下拔秆辊组成,拨秆轮由左右两支撑板和周向均匀分布的拨秆杆组成。拨秆杆将待作业的棉秆拨向后方拔秆辊,上拔秆辊上均匀分布有凹槽,可与拨秆杆相互配合将棉秆夹持住,并随着机具行走对棉秆进行夹持拔取作业。

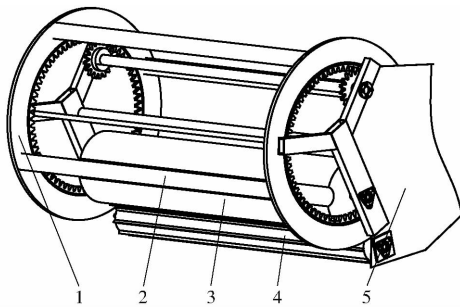


图2 棉秆拔取机构结构示意图

Fig.2 Structure diagram of cotton stalk pulling mechanism

1. 支撑板 2. 拨秆杆 3. 上拔秆辊 4. 下拔秆辊 5. 机架

2.1.1 拨秆过程分析

棉秆拔取机构在进行拨秆作业时,通过拨秆轮的旋转带动拨秆杆对棉秆进行拨秆,拨秆轮的绝对运动为机具的前进运动与拨秆轮自身旋转运动的合成,拨秆杆接触棉秆时的运动轨迹如图3所示。

以拨秆轮中心轴在地面上的投影点 O 为坐标原点,机具前进方向为 x 轴方向,竖直向上方向为 y 轴方向,建立直角坐标系,设当拨秆杆随着拨秆轮旋转开始作业时,棉秆与拨秆轮的运动轨迹相切于点 P ,棉秆在点 P 的速度 v 可以分解为一个水平分速

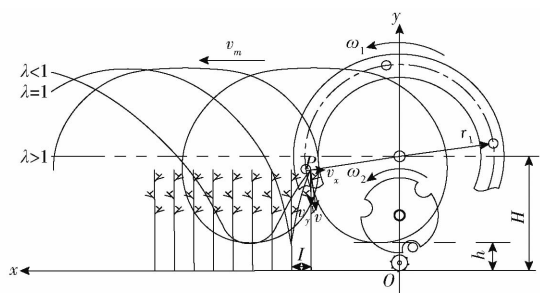


图3 拨秆轮工作过程示意图

Fig. 3 Schematic of working process of stalk wheel

度 v_x 和一个竖直向下的分速度 v_y ，则拨秆杆在点 P 接触棉秆时的水平与竖直分速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v_m - \omega_1 r_1 \sin(\omega_1 t) \\ v_y = -\omega_1 r_1 \cos(\omega_1 t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_m ——机具前进速度, m/s

r_1 ——拨秆杆轴心旋转半径, mm

ω_1 ——拨秆轮匀速转动角速度, rad/s

t ——拨秆轮匀速转动时间, s

设拨秆杆线速度 v_1 与机具前进速度 v_m 之比为 λ , 则

$$\lambda = \frac{v_1}{v_m} = \frac{\omega_1 r_1}{v_m} \quad (2)$$

从图3中可以看到, 拨秆杆的绝对运动方向为轨迹线的切线方向, 当 $\lambda \leq 1$ 时拨秆杆的运动轨迹为不带有环扣的摆线, 绝对运动速度方向没有水平向后的分速度, 不能完成拨秆作业; 当 $\lambda > 1$ 时拨秆杆的运动轨迹为余摆线, 在余摆线环扣最长水平横弦下方时, 拨秆杆具有水平向后的分速度, 对棉秆起到拨秆作用, 当棉秆拨送到上拨秆辊附近靠近上拨秆辊凹槽时, 棉秆在拨秆杆与上拨秆辊之间被夹持住, 为后续进行棉秆拔取作业提供基础。因此要想拨秆杆能够顺利将棉秆拨向拨秆辊进行拔取, 拨秆杆的线速度 v_1 与机具前进速度 v_m 之比 λ 应大于1。

拨秆杆竖直插入棉田进行拨秆作业时, 其水平方向的分速度为零, 即

$$v_x = v_m - r_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t) = 0 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)有

$$\sin(\omega_1 t) = \frac{v_m}{\omega_1 r_1} = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

从图3中可以看到

$$L = H - r_1 \sin(\omega_1 t) \quad (5)$$

式中 L ——棉秆平均高度, mm

H ——拨秆轮轴距离地面高度, mm

将式(4)代入式(5)有

$$H = L + \frac{r_1}{\lambda} \quad (6)$$

为了使拨秆轮能够完成拨秆与扶秆功能, 拨秆

杆在棉秆上的作用位置至关重要, 拨秆杆作用于棉秆位置太低时, 会出现由于夹持点距离棉秆根部过近, 根部还未完全拔出就拔断现象; 拨秆杆作用位置太高时, 会使棉秆漏拔数量增多, 因此, 取拨秆杆作用位置在棉秆的 $2/3$ 处, 则

$$H - h \geq r_1 + \frac{2}{3}(L - h) \quad (7)$$

式中 h ——棉秆初始夹持点离地高度, mm

将式(6)代入式(7)化简可得

$$r_1 \leq \frac{\lambda(L - h)}{3(\lambda - 1)} \quad (8)$$

新疆地区棉田采用“宽窄行”的一膜六行种植模式, 且棉秆具有“矮、密、细”的特点, 根据田间实地调研, 新疆地区棉秆高度平均值约为 800 mm, 在距离棉秆根部 300 mm 处将棉秆拔出作业效果好, 查阅《农业机械设计手册》^[19], 选择拨秆速比 λ 为 1.6, 将 L 、 h 、 λ 的值代入式(8)计算得出拨秆杆轴心旋转半径 $r_1 = 444$ mm。

将式(2)中的 v_1 代入公式

$$v_1 = \frac{\pi r_1 n_1}{30} \quad (9)$$

计算出拨秆轮转速 n_1 为

$$n_1 = \frac{30 v_m \lambda}{\pi r_1} \quad (10)$$

由式(10)可知拨秆轮转速与机具前进速度有关, 拨秆轮转速过快, 单位时间内拨向拨秆辊的棉秆数量过多, 造成棉秆拔取机构雍堵, 使棉秆拔取装置工作效率降低; 拨秆轮转速过慢, 拨秆杆的线速度 v_1 与机具前进速度 v_m 之比 $\lambda < 1$, 拨秆杆不能将棉秆拨向后方拨秆辊, 棉秆漏拔率增加, 前期预试验时机具前进速度 v_m 为 0.40 ~ 0.80 m/s, 代入式(10)可计算出拨秆轮转速 n_1 为 13.77 ~ 27.54 r/min。

2.1.2 拨秆过程分析

棉秆拔取机构工作过程具体可以分为4个阶段: 棉秆喂入阶段、棉秆夹持阶段、棉秆拔取阶段、棉秆输送阶段, 具体工作过程如图4所示。

2.1.2.1 棉秆喂入阶段

图4a为棉秆喂入阶段, 机具在行走过程中, 棉秆拔取装置逐渐靠近棉秆, 棉秆受到推力 F 向机具前进方向弯曲, 随着棉秆拔取机构旋转, 棉秆被喂入拨秆杆与上拨秆辊凹槽之间。

2.1.2.2 棉秆夹持阶段

图4b为棉秆夹持阶段, 拨秆轮与上拨秆辊同方向旋转, 当拨秆杆转动到拨秆杆轴心与上拨秆辊凹槽中心位于同一条直线时, 拨秆杆与上拨秆辊凹槽配合将棉秆夹持住。假设棉秆被夹持部分受力集中

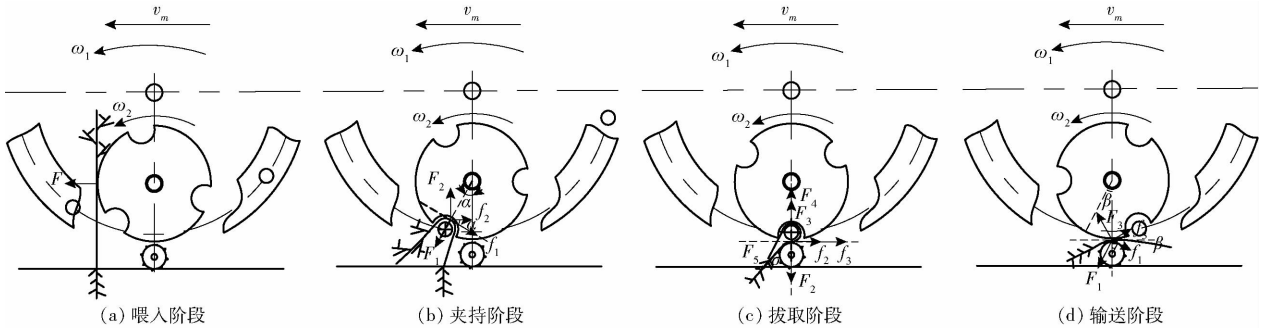


图 4 棉秆拔取机构工作过程示意图

Fig. 4 Schematics of working process of cotton stalk pulling mechanism

于一点,初始夹持角为 α ,当

$$f_1 + f_2 \cos \alpha \geq F_2 \sin \alpha \tag{11}$$

时,棉秆可被夹持住,由图 4b 可知

$$F_1 = F_2 \cos \alpha + f_2 \sin \alpha \tag{12}$$

将

$$\begin{cases} f_1 = \mu F_1 \\ f_2 = \mu F_2 \end{cases} \tag{13}$$

代入式(11)、(12)可得

$$\alpha \leq \arctan \frac{2\mu}{1 - \mu^2} = \arctan \frac{2 \tan \psi}{1 - \tan^2 \psi} \tag{14}$$

式中 F_1 ——上拔秆辊对棉秆的夹持力,N
 F_2 ——拔秆杆对棉秆的夹持力,N
 f_1 ——上拔秆辊对棉秆的摩擦力,N
 f_2 ——拔秆杆对棉秆的摩擦力,N
 μ ——棉秆与拔取机构间的摩擦因数
 ψ ——摩擦角, ($^\circ$)

由文献[20]可知秸秆摩擦角 ψ 为 $17^\circ \sim 27^\circ$,因此 α 为 $28^\circ \sim 42^\circ$,初始夹持角 α 过大会使拔秆杆与上拔秆辊凹槽间隙过大不能夹持住棉秆, α 过小会因为夹持拔取棉秆时间过短导致棉秆不能从地面完全拔出,考虑到机具作业效果及安装误差等因素,确定初始夹持角 α 为 30° 。

2.1.2.3 棉秆拔取阶段

图 4c 为棉秆拔取阶段,拔秆杆做圆周运动,棉秆在拔取过程中拔取力不断变化,当拔秆杆转动到图示位置时,棉秆被夹持住,通过拔秆杆与上、下拔秆辊相互配合将棉秆拔出地面。棉秆受到的拔取力 F_6 即为向心力 F_4 ,则下拔秆辊对棉秆的夹持力 F_3 为

$$F_3 = F_4 + F_2 = m \frac{v_m^2 \lambda^2}{r_1} + F_2 \tag{15}$$

式中 m ——棉秆质量,g

棉秆拔出所需要的力来自于棉秆与拔取机构之间的静摩擦力,大小不断变化,当棉秆被拔出处于临界状态,即土壤阻力在水平方向上的分力等于最大静摩擦力时,其水平方向受力为

$$f_{\max} = \mu(F_2 + F_3) \tag{16}$$

式中 $f_{\max}$ ——棉秆与拔取机构间最大静摩擦力,N

联立式(15)与式(16)有

$$f_{\max} = \mu \left(2F_2 + \frac{mv_m^2 \lambda^2}{r_1} \right) \tag{17}$$

由式(11)~(17)可知,当拔秆杆与下拔秆辊间隙一定时,棉秆拔取效果与机具前进速度有关,机具前进速度越大,棉秆受到的向心力越大,棉秆更容易拔出地面,但当机具前进速度过大时,易导致棉秆瞬时受力过大从而出现拔断现象;机具前进速度过小,最大静摩擦力小于土壤阻力,棉秆漏拔数量增多,由前期预试验可得,机具前进速度取值范围为 $0.40 \sim 0.80 \text{ m/s}$ 。

设拔秆杆与下拔秆辊间的比压为 p ,棉秆被拔出所经过的长度即棉秆根长为 K ,则棉秆在拔取过程中受到的合力为 $N = pK$,棉秆拔取过程中受到的土壤阻力为 F_5 ,则棉秆可以被拔出地面的条件为

$$F_6 = \mu N = \mu p K > F_5 \tag{18}$$

当棉秆拔取力 F_6 大于土壤阻力 F_5 时,棉秆被拔起。棉秆拔取的实际过程为棉秆拔取力 F_6 克服土壤阻力 F_5 对棉秆做功的过程,拔取力作用时间长短是棉秆能否被拔起的一个重要因素,当棉秆被拔出地面所经过的长度大于等于棉秆受到拔秆辊与拔秆杆夹持作用所经过的弧长,拔秆杆与拔秆辊对棉秆所做的功大于等于棉秆被从地面拔出所需要的功时,可将棉秆从地面拔出,即

$$\int_0^K F_5(x) dx \leq \int_{t_0}^{t_0+t_1} F_6 \omega_2 r_2 dt \tag{19}$$

式中 t_0 ——开始拔取棉秆时刻,s

t_1 ——拔出棉秆所需时间,s

ω_2 ——上拔秆辊角速度,rad/s

r_2 ——上拔秆辊半径,mm

棉秆夹持拔取工作过程凹槽边缘中心点轨迹如图 5 所示,以上拔秆辊轴中心为坐标原点 O ,竖直向上为 y 轴正方向,沿机具前进方向为 x 轴正方向,设棉秆在上拔秆辊凹槽内的初始夹持点位于点 A ,点 B 为棉秆拔取完成点。

则棉秆夹持点的运动轨迹为

均匀分布有 3 个凹槽。

2.1.2.4 棉秆输送阶段

图 4d 为棉秆输送阶段,随着棉秆拔取装置继续向前作业,拨秆杆与上拨秆辊凹槽间的配合间隙变大,因棉秆自身具有弹性,随着拨秆杆与上拨秆辊凹槽间的间隙变大,棉秆依靠自身弹性自动脱离拨秆杆并受到来自上、下拨秆辊的夹持力 F_1 、 F_3 ,摩擦力 f_1 、 f_3 ,上、下拨秆辊的对辊作用将棉秆输送到棉秆输送机构,完成后续棉秆输送作业。

棉秆在输送过程的受力分析局部放大图如图 6 所示。

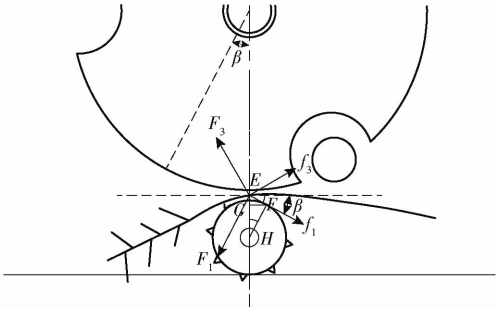


图 6 棉秆输送过程受力分析

Fig. 6 Force analysis chart of cotton stalk conveying process

棉秆被输送到链板式棉秆输送机构时需要满足条件

$$f_3 \cos \beta + f_1 \cos \beta \geq F_3 \cos \beta + F_1 \cos \beta \tag{32}$$

式中 β ——棉秆输送角, (°)

将
$$f_3 = \mu F_3 \tag{33}$$

代入式(32)可得

$$\mu \geq \tan \beta \tag{34}$$

由图 6 可知

$$\begin{cases} L_{EF}^2 + r_3^2 = (r_4 + r_3)^2 \\ \tan \beta = \frac{L_{EF}}{r_3} \end{cases} \tag{35}$$

式中 L_{EF} ——EF 长度, mm

r_4 ——棉秆半径, mm

r_3 ——下拨秆辊半径, mm

将式(34)代入式(35)可得

$$r_3 \geq \frac{r_4}{\sqrt{1 + \mu^2} - 1} \tag{36}$$

棉秸秆与拨秆辊之间摩擦因数 μ 一般为 0.3 ~ 0.7^[21],新疆地区棉秆半径为 5 mm,将 $\mu = 0.41$ 、 $r_4 = 5$ mm 代入式(36)可得下拨秆辊半径 $r_3 \geq 61$ mm,从式(34)、(35)可以看出,当下拨秆辊半径 r_3 增大时,棉秆输送角会减小,上、下拨秆辊输送棉秆的能力增加,棉秆会更容易被输送至后方棉秆输送机构,因此下拨秆辊半径设定为 80 mm。

棉秆在上、下拨秆辊间输送时受到压缩,可用压

缩比 η 表示对棉秆的压缩程度,即

$$\eta = \frac{D_4 - h_0}{h_0} \tag{37}$$

式中 D_4 ——棉秆直径, mm

h_0 ——上、下拨秆辊间隙, mm

当 η 过小即 h_0 过大时,棉秆与上、下拨秆辊间产生滑动,因此棉秆漏拔数量增多; η 过大会使棉秆过度被挤压从而导致棉秆被压断,造成拥堵,下拨秆辊由根圆半径为 80 mm 的基轴与均布于其上的拨齿组成,为了使棉秆拔取装置作业效果较好,降低漏拔率与拔断率,结合机具实际安装情况,设计上拨秆辊与下拨秆辊基圆柱之间间隙为 10 mm,而位于此间隙之间的拨齿间隙小于棉秆最小直径,可保证棉秆的有效运输。

2.2 链板式棉秆输送机构

链板式棉秆输送机构主要是将棉秆拔取机构拔出的棉秆输送至后方螺旋输送机,其结构示意图如图 7 所示,主要包括输送链板、输送链条、齿轮、固定板、螺纹紧固件等零部件。

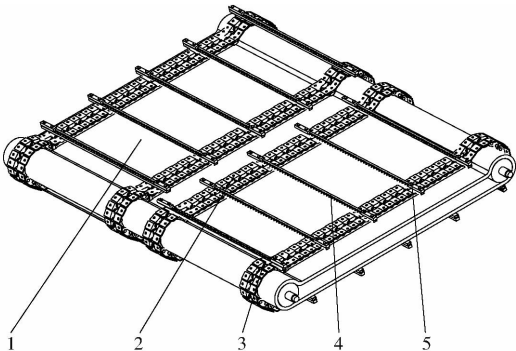


图 7 链板式棉秆输送机构结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of chain plate cotton stalk conveying mechanism

1. 输送链板 2. 输送链条 3. 齿轮 4. 固定板 5. 螺纹紧固件

为了便于将棉秆输送至螺旋输送机,防止棉秆在输送过程中从输送链板滑落,增加对棉秆的输送能力,固定板等间距交错安装在输送链板上。固定板安装距离过大会降低棉秆输送效率,过小会使安装板的数量过多,造成资源浪费,成本增加,结合试验情况,固定板数量设定为 20 个,排列间距为 300 mm。

棉秆被拔取后,通过上下拨秆辊的对辊作用将棉秆输送至棉秆输送链板,棉秆在输送链板上的运动为复合运动,速度分析如图 8 所示,由图 8 可知棉秆运动的绝对速度为机具前进速度与链板式输送速度的合速度,为了保证棉秆能够输送至螺旋输送机不发生拥堵,需要满足

$$v_3 \geq v_m \tag{38}$$

式中 v_3 ——输送链板线速度, m/s

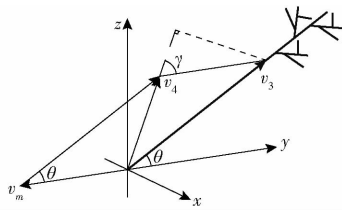


图 8 棉秆在输送机构上速度分析

Fig. 8 Velocity analysis diagram of cotton stalks on conveying mechanism

由图 8 可知

$$\begin{cases} \cos\theta = \frac{v_m^2 + v_3^2 - v_4^2}{2v_m v_3} \\ v_3 \sin(\gamma - \theta) = v_m \sin\gamma \\ \frac{v_3}{v_m} = \frac{\sin\gamma}{\sin(\gamma - \theta)} = k \end{cases} \quad (39)$$

式中 v_4 ——机具前进速度与输送链板线速度的合速度, m/s

γ ——输送链板绝对速度与水平方向夹角, ($^\circ$)

k ——比例系数

由式(38)和式(39)可知输送链板线速度 v_3 与机具前进速度 v_m 具有一定的比例关系, 棉秆与输送链板间存在静摩擦, 输送角度与摩擦阻力成比例关系, 当棉秆输送速度与水平方向的夹角 θ 过大时, 棉秆输送链板不能将棉秆输送至后方螺旋输送机, 过小会使棉秆输送时间过长, 影响工作效率, 根据文献[22-24]可知, 棉秆的动态休止角范围为 $17^\circ \sim 31^\circ$, 为了使棉秆输送效果较好, 结合各零部件安装及尺寸要求, 设定链板式输送机构倾斜角 θ 为 30° 。将 $\theta = 30^\circ$ 代入式(39)并进行化简有

$$\gamma \leq \operatorname{arccot}\left(\sqrt{3} - \frac{2}{k}\right) \quad (40)$$

将式(38)、(39)代入式(40)可得

$$\gamma \leq 75^\circ \quad (41)$$

所以棉秆可以在输送链板上被输送至螺旋输送机不发生滑落, 不产生拥堵时输送链板线速度与机具前进速度的比值 k 需要满足 $1 \leq k \leq 1.36$, 当机具速度为 $0.40 \sim 0.80$ m/s 时, 链板输送速度为 $0.40 \sim 1.08$ m/s。

2.3 螺旋输送机

为了将输送链板上的棉秆输送至后续棉秆粉碎装置进行粉碎, 结合棉秆粉碎装置结构尺寸要求和棉秆物理特性, 选用结构简单、运输效果好的螺旋输送机。螺旋输送机主要由旋转中心轴、螺旋叶片、罩壳组成, 在满足工作强度的情况下, 考虑到轻量化和经济性要求, 旋转空心轴设计为空心管状。为了防

止棉秆在输送过程中发生堵塞, 螺旋输送机棉秆输出量应大于输送链板棉秆喂入量。螺旋输送机棉秆输送量公式为

$$Q = 47D_5^2 S n_3 \varphi \rho \zeta \quad (42)$$

式中 Q ——棉秆输送量, t/h

D_5 ——螺旋公称直径, mm

S ——螺距, mm

n_3 ——螺旋输送机转速, r/min

φ ——填充系数, 取 0.2

ρ ——棉秆单位容积质量, 取 0.4 t/m^3

ζ ——倾斜系数, 取 1

根据前期田间调研, 一膜六行种植模式下, 5 m 内的棉秆总质量平均为 4.9 kg , 因此棉秆在单位长度上的质量 m_1 为 0.98 kg/m , 所以最大棉秆喂入量 $Q_{\max}$ 为

$$Q_{\max} = m_1 v_{\max} \quad (43)$$

则螺旋输送机转速为

$$n_3 \geq \frac{Q_{\max}}{47D_5^2 S \varphi \rho \zeta} \quad (44)$$

根据农业机械螺旋输送标准及实际设计要求, 确定螺旋叶片直径为 315 mm , 螺距为 315 mm , 机具最大作业速度为 0.80 m/s , 则当螺旋输送机转速大于等于 90 r/min 时, 可使棉秆输送效果较好。

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证夹持辊式棉秆拔取装置工作的可靠性与作业性能, 确定其最优工作参数, 于 2021 年 10 月在新疆生产建设兵团进行田间试验。试验田长度 750 m , 宽度 50 m , 采用宽窄行 ($660 \text{ mm} + 100 \text{ mm}$) 平作种植模式, 已经完成棉花收获、复采等作业, 试验田地势平坦、无障碍物。试验田土壤类型为沙壤土, 试验当天环境温度为 13°C , 空气湿度为 27% 。测得试验田平均土壤紧实度为 $4\,047.56 \text{ kPa}$, 平均土壤含水率为 19.8% 。夹持辊式棉秆拔取装置安装在自走式棉秆拔取与残膜回收联合作业机上, 试验仪器包括转速仪、电子秤、皮尺、秒表、TZS-1K-G 型土壤水分测试仪、TJSD-750-2 型土壤紧实度测定仪等, 田间试验如图 9 所示。

3.2 试验因素

通过对棉秆拔取装置的结构设计及工作原理分析, 选取影响棉秆拔取效果的 3 个因素: 机具前进速度、上拔秆辊转速、机具前进速度与拔秆轮线速度比值(简称速比)作为试验因素。

(1) 机具前进速度

进行田间试验时驾驶员通过调节自走式棉秆拔



图 9 田间试验
Fig. 9 Field experiment

取粉碎与残膜回收联合作业机挡位改变机具前进速度,结合田间实际情况,选取机具前进速度分别为 0.47、0.60、0.73 m/s。

(2) 上拔秆辊转速

上拔秆辊转速通过改变上拔秆辊轴上链轮大小实现转速调整,试验中保持机具发动机转速恒定,根据机具实际输出转速,实测经链传动系统传至上拔秆辊的转速分别为 40、48、56 r/min。

(3) 速比

上拔秆辊转速变化通过链传动引起拨秆轮转速变化,进而影响拨秆轮线速度,速比对棉秆拔取效果有重要影响,过大会使拨秆轮不能将棉秆拨向拔秆辊导致棉秆漏拔率增加,过小会导致棉秆根部还未被拔起就出现棉秆拔断现象,因此选取速比为 0.50、0.60、0.70。

试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Test factors and codes

编码	因素		
	机具前进速度	上拔秆辊转速	速比 x_3
	$x_1/(m \cdot s^{-1})$	$x_2/(r \cdot min^{-1})$	
-1	0.47	40	0.50
0	0.60	48	0.60
1	0.73	56	0.70

3.3 试验指标

试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械联合收割机试验方法》与 GB/T 5262—2008《农业机械设计条件 测定方法的一般规定》规定的试验方法检验夹持辊式棉秆拔取装置的棉秆拔取效果。试验地测区长度为 50 m,测区前稳定区为 30 m,测区后停车区为 20 m,宽度为拔秆装置 6 倍工作幅宽,按照 3 个作业速度满幅作业,每一前进速度为一个试验工况,共为 3 个试验工况,每个工况测定 2 个行程,测试 3 个往返行程。采用 5 点法测定:每点测定 1 m × 1 m 区域内棉秆总株数,计算平均值,记为 M_0 。选取拔断率 Y_1 、漏拔率 Y_2 为指标,计算方式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_0} \times 100\%$$

(45)

$$Y_2 = \frac{M_2}{M_0} \times 100\%$$

(46)

式中 M_1 ——机具作业后拔断棉秆数量,株
 M_2 ——机具作业后漏拔棉秆数量,株

3.4 试验方案及结果

试验采用三因素三水平二次回归响应面试验^[25],选择 Box-Behnken 试验设计方法,试验结束后记录测区内棉秆漏拔的数量和拔断的数量,根据式(45)和式(46)计算出棉秆拔断率和棉秆漏拔率,结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test plan and result

试验 序号	因素			拔断率	漏拔率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	0	0	4.84	5.75
2	0	1	-1	9.32	5.72
3	0	-1	1	4.88	9.34
4	-1	0	-1	4.56	5.28
5	0	0	0	4.26	5.42
6	-1	0	1	5.78	9.42
7	0	0	0	3.53	6.44
8	0	0	0	4.15	5.97
9	1	0	-1	5.25	4.34
10	0	1	1	12.48	12.16
11	1	-1	0	5.44	7.15
12	1	1	0	12.25	8.19
13	-1	-1	0	4.33	5.79
14	0	-1	-1	4.76	5.65
15	0	0	0	3.98	5.43
16	-1	1	0	7.68	5.93
17	1	0	1	7.53	13.14

3.5 试验结果分析及优化

3.5.1 回归模型建立与检验

利用 Design-Expert 软件对表 2 数据进行分析处理,得到棉秆拔断率、漏拔率的回归模型,其方差分析结果如表 3 所示。

由表 3 可知,拔断率 Y_1 、漏拔率 Y_2 的回归模型 $P < 0.01$,说明该模型极显著;决定系数 R^2 均大于 0.97,说明模型可靠,可对 97% 以上的试验指标进行拟合。

采用多元回归拟合的方式对试验结果进行处理,得到机具前进速度、上拔秆辊转速、速比对棉秆拔断率 Y_1 、漏拔率 Y_2 的回归方程为

$$Y_1 = 4.15 + 1.02X_1 + 2.79X_2 + 0.85X_3 + 0.86X_1X_2 + 0.27X_1X_3 + 0.76X_2X_3 + 0.6X_1^2 + 2.68X_2^2 + 1.03X_3^2$$

(47)

$$Y_2 = 5.8 + 0.8X_1 + 0.51X_2 + 2.88X_3 + 0.22X_1X_2 + 1.17X_1X_3 + 0.69X_2X_3 + 0.4X_1^2 + 0.57X_2^2 + 1.85X_3^2$$

(48)

表 3 回归模型方差分析

Tab. 3 Regression model analysis of variance						
指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
拔断率 Y_1	模型	120.54	9	13.39	34.47	<0.000 1 **
	X_1	8.24	1	8.24	21.21	0.002 5 **
	X_2	62.27	1	62.27	160.28	<0.000 1 **
	X_3	5.75	1	5.75	14.79	0.006 3 **
	X_1X_2	2.99	1	2.99	7.70	0.027 5 *
	X_1X_3	0.28	1	0.28	0.72	0.423 3
	X_2X_3	2.31	1	2.31	5.95	0.044 9 *
	X_1^2	1.5	1	1.5	3.86	0.090 3
	X_2^2	30.16	1	30.16	77.63	<0.000 1 **
	X_3^2	4.48	1	4.48	11.53	0.011 5 *
	残差	2.72	7	0.39		
	失拟	1.82	3	0.61	2.69	0.181 6
	误差	0.9	4	0.23		
	总和	123.26	16			
漏拔率 Y_2	模型	98.67	9	10.96	35.48	<0.000 1 **
	X_1	5.12	1	5.12	16.57	0.004 7 **
	X_2	2.07	1	2.07	6.70	0.036 *
	X_3	66.53	1	66.53	215.3	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.2	1	0.2	0.66	0.444 9
	X_1X_3	5.43	1	5.43	17.57	0.004 1 **
	X_2X_3	1.89	1	1.89	6.12	0.042 6 *
	X_1^2	0.66	1	0.66	2.13	0.187 9
	X_2^2	1.36	1	1.36	4.39	0.074 3
	X_3^2	14.38	1	14.38	46.52	0.000 2 **
	残差	2.16	7	0.31		
	失拟	1.44	3	0.48	2.66	0.184 1
	误差	0.72	4	0.18		
	总和	100.83	16			

注：* 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)；** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

3.5.2 因素对试验指标影响响应面分析

为了解各因素间的交互作用对棉秆拔断率 Y_1 、漏拔率 Y_2 的影响,采用 Design-Expert 得到各因素对拔断率、漏拔率影响的响应面,如图 10 所示。

由图 10a 可知,上拔秆辊转速对棉秆拔断率的影响比机具前进速度更显著。当速比为 0.60、上拔秆辊转速固定为 40 r/min 时,随着机具前进速度的增加,棉秆拔断率 Y_1 缓慢上升变化幅度较小,这是因为当机具前进速度增加时,走过一个棉秆株距所用时间减少,小于棉秆根部被拔出所用时间,棉秆拔断率增加;当机具前进速度固定为 0.47 m/s 时,随着上拔秆辊转速的增加,棉秆拔断率增加幅度较大,这是因为当上拔秆辊转速过快时,会使棉秆拔取时间过短,大量棉秆不能被拔出地面,棉秆拔断率增加。

由图 10b、10c 可知,上拔秆辊转速对棉秆拔断率的影响比速比更显著;速比对棉秆漏拔率的影响

比上拔秆辊转速更显著。当机具前进速度为 0.6 m/s、速比固定为 0.50 时,随着上拔秆辊转速增加,棉秆拔断率变化幅度较大,棉秆漏拔率变化幅度较小,这是因为上拔秆辊转速过大会导致棉秆还未完全拔出地面机具就继续向前作业,棉秆拔断数量增加,拔断率增加,少量棉秆根部留在田间,棉秆漏拔率增加;当上拔秆辊转速固定为 40 r/min 时,随着速比增加,棉秆拔断率变化幅度较小,棉秆漏拔率变化幅度较大,这是因为速比增加会使拔取棉秆的时间变短,导致棉秆拔断率增加,速比过大会导致棉秆拔取机构作业过程中不能形成封闭环线,棉秆漏拔数量增加,棉秆漏拔率增加。

由图 10d 可知,速比对棉秆漏拔率的影响比机具前进速度更显著。当上拔秆辊转速为 48 r/min、速比固定为 0.50 时,棉秆漏拔率 Y_2 随着机具前进速度的增加缓慢上升,变化幅度较小,这是因为当机具前进速度增加时,拨秆轮拨向拔秆辊所用时间相对减少,棉秆被夹持住的数量减少,棉秆漏拔率增加;当机具前进速度固定为 0.47 m/s 时,随着速比的增加,棉秆漏拔率增加,变化幅度较大,这是因为当速比过大时,拨秆轮的运动轨迹会变成没有环扣的摆线,不能将棉秆拨向后方拔秆辊,棉秆漏拔率大大增加。

3.5.3 参数优化与试验验证

为获得影响夹持辊式棉秆拔取装置作业效果的最优因素组合,利用 Design-Expert 软件对建立的线性回归模型进行优化,以降低棉秆拔断率、漏拔率为目标,设置优化模型为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.47 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 0.73 \text{ m/s} \\ 40 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 56 \text{ r/min} \\ 0.5 \leq x_3 \leq 0.7 \end{cases} \end{cases} \quad (49)$$

得到的最优因素组合为:机具前进速度 0.58 m/s、上拔秆辊转速 46 r/min、速比 0.53,此时棉秆拔断率为 3.53%,漏拔率为 4.74%。

为验证优化后回归模型的可靠性,考虑到试验可行性,将以上数据进行规整,以机具前进速度 0.60 m/s,上拔秆辊转速 46 r/min,速比 0.50,在新疆生产建设兵团进行田间试验验证,试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。

试验结果表明,采用以上参数进行田间试验时的棉秆拔断率为 3.68%,漏拔率为 5.19%,田间试验结果与模型优化值相对误差不超过 5%,满足设计要求,模型优化可行。

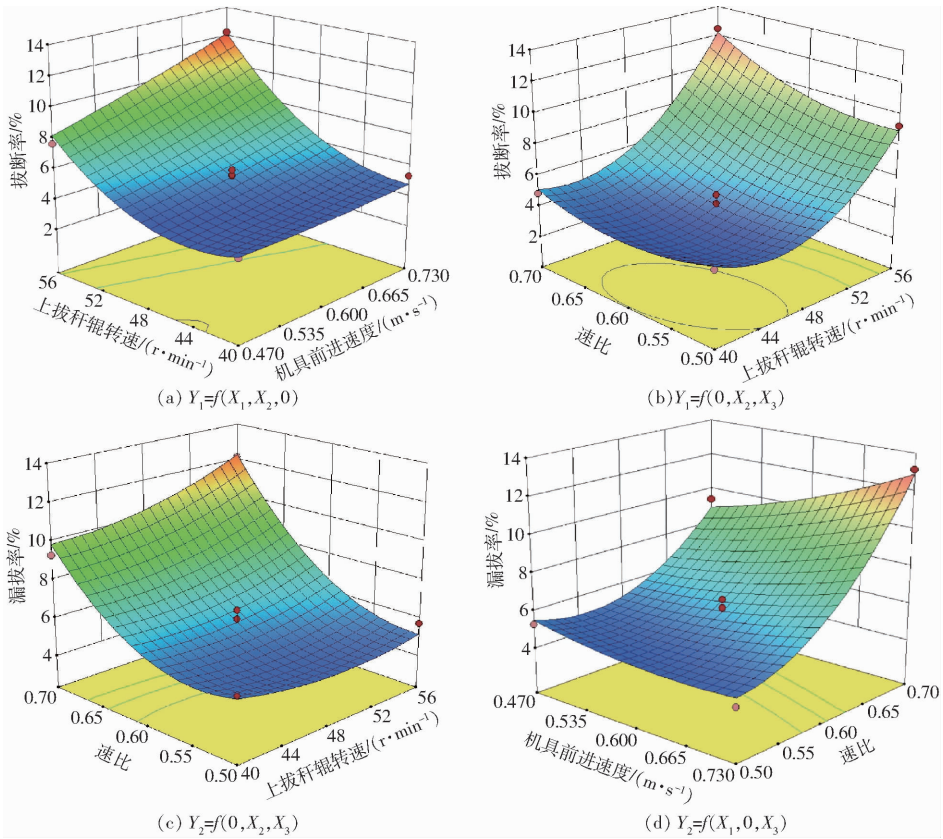


图 10 试验因素对棉秆拔断率和漏拔率交互影响的响应面

Fig. 10 Interaction effect of test factors on stalk breakage rate and missed plucking rate

4 结 论

(1) 针对现有棉秆收获机械拔断率、漏拔率高, 作业时需对行等问题, 设计了一种夹持辊式棉秆拔取装置。通过对棉秆拔取机构作业过程进行运动学与动力学分析, 确定了各部件的结构参数与工作参数。

(2) 制作了夹持辊式棉秆拔取装置, 以机具前进速度、上拔秆辊转速、机具前进速度与拨秆轮线速度比值作为试验因素, 棉秆拔断率、漏拔率为试验指标进行田间试验, 试验结果表明上拔秆辊转速对棉

秆拔断率的影响比机具前进速度、速比更显著; 速比对棉秆漏拔率的影响比机具前进速度、上拔秆辊转速更显著。

(3) 对建立的线性回归模型进行优化, 得到的最优因素组合为: 机具前进速度 0.58 m/s、上拔秆辊转速 46 r/min、速比 0.53, 此时棉秆拔断率为 3.53%, 漏拔率为 4.74%。以机具前进速度 0.60 m/s, 上拔秆辊转速 46 r/min, 机具前进速度与拨秆轮速度比为 0.50 进行田间试验验证, 得到棉秆拔断率为 3.68%, 漏拔率为 5.19%, 相对误差不超过 5%, 模型优化可靠。

参 考 文 献

[1] 胡凯, 王吉奎, 李斌, 等. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 24–32.
HU Kai, WANG Jikui, LI Bin, et al. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 24–32. (in Chinese)

[2] 成伟, 陈汉平, 杨海平, 等. 棉秆燃烧过程中的颗粒物排放特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 223–228.
CHENG Wei, CHEN Hanping, YANG Haiping, et al. Emission characteristics of particulate matter during combustion of cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 223–228. (in Chinese)

[3] 何瑞银, 段庆飞, 陈信信, 等. 旋耕还田秸秆空间分布质量离散元分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 44–53.
HE Ruiyin, DUAN Qingfei, CHEN Xinxin, et al. DEM analysis of spatial distribution quality of rotary tillage straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 44–53. (in Chinese)

[4] 李怡, 张国忠, 周勇, 等. 棉秆田间起拔力测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 43–50.
LI Yi, ZHANG Guozhong, ZHOU Yong, et al. Design and field experiment of drawing resistance measurement system for cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 43–50. (in Chinese)

[5] 张佳喜, 刘阿朋, 李骅, 等. 棉花秸秆炭微波裂解生产设备研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 219–225.
ZHANG Jiaxi, LIU Apeng, LI Hua, et al. Development of microwave pyrolysis equipment for cotton stalk carbon[J].

- Transactions of the CSAE, 2020, 36(8): 219 – 225. (in Chinese)
- [6] 宋占华, 宋华鲁, 闫银发, 等. 棉花秸秆往复式切割器刀片优化设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 42 – 49. SONG Zhanhua, SONG Hualu, YAN Yinfa, et al. Optimizing design on knife section of reciprocating cutter bars for harvesting cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 42 – 49. (in Chinese)
- [7] 董倩, 唐松, 徐禄江, 等. 乙二醇-氯化铁预处理对棉秆酶水解效率的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 213 – 220. DONG Qian, TANG Song, XU Lujiang, et al. Effects of ethylene glycol-ferric chloride pretreatment on the enzymatic hydrolysis of cotton stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(14): 213 – 220. (in Chinese)
- [8] 贺小伟, 刘金秀, 徐杨, 等. 4MB – 6 型密植棉秆对行铲拔铺放机改进设计[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 21 – 30. HE Xiaowei, LIU Jinxiu, XU Yang, et al. Improvement design of 4MB – 6 row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks in close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 21 – 30. (in Chinese)
- [9] PAN Z G. Research on cotton stalk harvester based on double roller type[J]. Advanced Materials Research, 2014, 945 – 949: 286 – 289.
- [10] 贺小伟, 刘金秀, 王旭峰, 等. 密植棉秆对行铲拔铺放机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 142 – 151. HE Xiaowei, LIU Jinxiu, WANG Xufeng, et al. Design and experiment of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks based on agronomy of close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 142 – 151. (in Chinese)
- [11] 陈明江, 赵维松, 王振伟, 等. 齿盘式多行拔棉秆装置拔秆过程分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 109 – 120. CHEN Mingjiang, ZHAO Weisong, WANG Zhenwei, et al. Operation process analysis and parameter optimization of dentate disc cotton-stalk uprooting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 109 – 120. (in Chinese)
- [12] 张佳喜, 汪珽珽, 陈明江, 等. 齿盘式棉秆收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 1 – 8. ZHANG Jiayi, WANG Tingjue, CHEN Mingjiang, et al. Design of toothed disc cotton stalk harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 1 – 8. (in Chinese)
- [13] 张佳喜, 芮照钰, 蔡佳麟, 等. 前置式皮带夹持输送棉秆起拔机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 77 – 84, 152. ZHANG Jiayi, RUI Zhaoyu, CAI Jialin, et al. Design and test of front mounted belt clamping and conveying cotton-stalk pulling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 77 – 84, 152. (in Chinese)
- [14] 蔡佳麟, 张佳喜, 叶尔波拉提·铁木尔, 等. 夹持带式棉秆收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 152 – 160. CAI Jialin, ZHANG Jiayi, YEERBOLATI·TIEMUER, et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 152 – 160. (in Chinese)
- [15] 叶尔波拉提·铁木尔, 张佳喜, 蔡佳麟, 等. 夹持输送式棉花拔秆机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(2): 177 – 186. YEERBOLATI·TIEMUER, ZHANG Jiayi, CAI Jialin, et al. Design and test of a harvester for clamping and conveying cotton stalk[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(2): 177 – 186. (in Chinese)
- [16] 唐遵峰, 韩增德, 甘帮兴, 等. 不对行棉秆拔取收获台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 80 – 85. TANG Zunfeng, HAN Zengde, GAN Bangxing, et al. Design and experiment on cotton stalk pulling head with regardless of row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 80 – 85. (in Chinese)
- [17] 张爱民, 王振伟, 刘凯凯, 等. 棉秆联合收获机关键部件设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(5): 8 – 13. ZHANG Aimin, WANG Zhenwei, LIU Kaikai, et al. Design and experiment of the key parts with cotton-stalk combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 8 – 13. (in Chinese)
- [18] 武建设, 陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5 – 10. WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 5 – 10. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 杨明韶, 杜健民. 草业工程机械学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [21] 张佳喜, 邵周明, 蔡佳麟, 等. 横轴对辊式棉秆起拔装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 43 – 52. ZHANG Jiayi, GAO Zhouming, CAI Jialin, et al. Design and experiments of cotton stalk pulling machine with horizontal-counter rollers[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 43 – 52. (in Chinese)
- [22] 霍丽丽, 田宜水, 赵立欣, 等. 农作物秸秆原料物理特性及测试方法研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 86 – 92. HUO Lili, TIAN Yishui, ZHAO Lixin, et al. Research on physical of crop straw and test methods[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(6): 86 – 92. (in Chinese)
- [23] 田宜水, 姚宗路, 欧阳双平, 等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 124 – 128. TIAN Yishui, YAO Zonglu, OUYANG Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 124 – 128. (in Chinese)
- [24] 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189 – 195. HUO Lili, MENG Haibo, TIAN Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 189 – 195. (in Chinese)
- [25] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.