doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.002

皮条-弹齿式遗留棉回收装置捡拾滚筒设计与试验

何　磊[1,2]　陈学庚[1,3]　卢　雨[1]　鲍鹏宇[1]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.新疆农垦科学院机械装备研究所,石河子 832000;
3.现代农业机械兵团重点实验室,石河子 832003)

摘要:针对新疆地区机采棉田遗留棉回收装置捡拾率低的问题,结合新疆棉田种植模式及遗留棉机械捡拾的作业要求,设计了一种皮条-弹齿式遗留棉回收装置。阐述了该装置的结构组成和工作原理,对其关键部件捡拾滚筒进行了作业过程分析和关键参数设计。根据设计结果试制了样机,以遗留棉的落地棉捡拾率、枝上棉捡拾率为试验指标,以机具作业速度、捡拾滚筒转速和捡拾皮条间距为试验因素,进行了三因素三水平 Box-Behnken 响应面分析试验,并通过 Design-Expert 10.0 软件建立了评价指标与各影响因素的数学回归模型,分析了显著因素对评价指标的影响规律,优化了试验参数,确定最优参数组合:机具作业速度为 0.7 m/s、捡拾滚筒转速为 260 r/min、捡拾皮条间距为 120 mm 时,落地棉捡拾率为 90.01%、枝上棉捡拾率为 89.76%,各项性能指标均达到了设计要求。

关键词:遗留棉;皮条-弹齿式;捡拾滚筒

中图分类号:S225.91+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0024-10　　**OSID**:

Design and Test of Strap-Spring Tooth Type Residual Cotton Recovery Device for Picking Roller

HE Lei[1,2]　CHEN Xuegeng[1,3]　LU Yu[1]　BAO Pengyu[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832003, *China*
2. *Machinery and Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi* 832000, *China*
3. *Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: In view of the low picking rate of remaining cotton recycling device in the mechanized cotton picking field in Xinjiang, combined with the planting mode of the cotton field in Xinjiang and the operation requirements of the mechanical picking up of the remaining cotton, a kind of strap-spring tooth type residual cotton recovery device was designed. The structure and working principle of the device were described, and the operation process analysis and key parameters design of the key components of the pick-up drum were carried out. According to the design results, a prototype was trial-manufactured. Taking the picking rate of cotton leftover from the ground and cotton pick-up rate on branches as the test index, the working speed of the machine, the speed of the picking drum and the spacing of picking straps as the test factors, the three-factor and three-level Box-Behnken response surface analysis test was carried out, and the mathematical regression model between the evaluation index and the influencing factors was established by Design-Expert 10.0 software. The influence of significant factors on the evaluation indicators was analyzed, the test parameters were optimized, and the optimal parameter combination was determined to be as follows: when the machine operating speed was 0.74 m/s, the pickup roller speed was 260 r/min, and the pickup strip spacing was 120 mm, the picking rate of cotton leftover from the ground was 90.01%, and cotton pick-up rate on branches was 89.76%. All performance indicators met the design requirements.

Key words: residual cotton; strap-spring tooth type; picking roller

收稿日期:2026-01-09　修回日期:2026-01-16

基金项目:兵团自然科学基金面上项目(2025DA037)、兵团重点领域科技攻关项目(2025AB038)、现代农业机械兵团重点实验室开放课题(XDNJ2024005)、新疆战略人才培养计划特需专业化人才项目(XJRC-2025-BTRS-PY-TX-004)和石家庄市对口支援西部地区科技创新专项(2515104507A)

作者简介:何磊(1985—),男,博士生,新疆农垦科学院研究员,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:hel2024@163.com

通信作者:陈学庚(1947—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事农业机械设计研究,E-mail:chenxg130@sina.com

0　引言

棉花是我国重要的经济作物。新疆是国内三大棉区之一，其棉花种植规模、总产量和机械化采收水平均居全国前列[1-3]。据统计，2024 年新疆棉花播种面积 2.448×10^6 hm^2，占全国的 86.2%，产量为 5.686×10^6 t，占全国总产量的 92.2%，耕种收综合机械化率达到 97%，机采率达到 90.8%[4-5]。新疆机采后的棉田存在遗留棉残留量大、传统回收方式效率低下的问题。机械采摘后棉田的遗留棉花按照空间分布，主要包括枝上棉（漏采棉、挂枝棉）和落地棉（自然成熟掉落棉、采棉机碰撞掉落棉）[6-8]。遗留棉不仅带来了严重的资源浪费和经济损失，还引发了环境污染问题[9-10]。如今棉花产业面临提质增效的双重挑战，而高效回收遗留棉，不仅能减少资源浪费，还能提升棉花总产量，提高植棉户综合经济效益，增强市场竞争力。

国外较早开展了遗留棉回收机械的研究，相关文献记载的回收方式主要有钩取式、静电吸附式和夹取式[11-13]。但由于国外棉花种植模式与我国存在差异，且其采棉机采净率较高，对遗留棉回收的需求较小，因此近年来该领域研究相对较少。国内当前的遗留棉回收装置主要分为机械式和气力式两类。如 WANG 等[14]深入探究了锯齿式落地棉捡拾装置的作业原理，并构建了该机构运动过程的离散元模型。成波[15]设计出一种牵引式落地棉捡拾机，将落地棉的捡拾、清杂和存储功能有效整合，通过仿真分析与田间试验验证了其实际应用效果。胡进军[16]研发了一种新型采棉机，依靠爪板与拾棉辊的协同工作，实现了落地棉与棉株上的棉花同步回收。霍德义等[17]采用弹齿式捡拾装置，成功完成落地棉的拾取。袁小伟等[18]利用胶条高速转动，实现地表棉花的拾取与抛送。朱贞[19]发明的落地棉风机可用于棉花加工，既能高效收集田间遗落棉，又能过滤其中的沙土颗粒。然而，爪板与拾棉辊协同作业的遗留棉回收装置作业效率欠佳；胶条式和弹齿式捡拾装置仅能回收地表棉花，且弹齿式结构易勾起地膜和滴灌带；气吸式捡拾装置工作时会吸入大量杂质。因此，为实现遗留棉高效、低杂、低损收获，遗留棉回收装置需同时捡拾地上和枝上的棉花，并保证回收棉花的含杂率和损伤率较低。

为此，本文设计一种皮条-弹齿式遗留棉回收装置。通过动力学分析方法，对该装置关键部件捡拾滚筒开展理论研究，明确影响捡拾滚筒作业性能的关键参数与结构，探究遗留棉回收过程中影响捡拾率的主要因素并确定最优参数组合。

1　遗留棉回收装置总体结构与工作原理

1.1　总体结构

新疆地区棉花覆膜种植主要以 660 mm + 100 mm 一膜六行宽窄行配置的机采棉模式为主，通常与一膜三带或一膜两管的滴灌系统配套使用。本文根据新疆棉花种植模式，设计了皮条-弹齿式遗留棉回收装置，结构如图 1 所示，主要由捡拾滚筒、锯齿清杂装置、脱棉装置、输送装置、传动系统和机架等组成。其中捡拾滚筒上呈圆周状分布有捡拾弹齿和捡拾皮条；锯齿清杂装置由锯齿滚筒、清杂毛刷和圆钢格条栅等组成。遗留棉回收装置捡拾腔由机架和侧板组成，前端为捡拾入口，后端为出棉口。捡拾装置、锯齿清杂装置、脱棉装置和输送装置沿机具前进方向依次设置在捡拾腔内。三级链传动系统布置在捡拾腔两侧，驱动各功能单元协同作业，可一次性实现遗留棉的捡拾、清杂和输送作业。

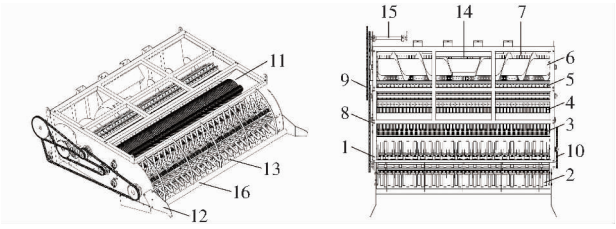


图 1　皮条-弹齿式遗留棉回收装置结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of the strap-spring tooth type residual cotton recovery device

1. 机架　2. 捡拾滚筒　3. 清杂毛刷　4. 锯齿滚筒　5. 脱棉滚筒　6. 螺旋输送器　7. 排杂筛网　8. 一级链传动　9. 二级链传动　10. 三级链传动　11. 捡拾腔　12. 扶禾侧板　13. 进棉口　14. 出棉口　15. 动力主轴　16. 压辊

1.2　工作原理

作业前，装置通过多点式牵引架与动力机具悬挂机构刚性连接，通过液压调节机构实现工作高度调控，确保仿形精度。作业时，动力主轴经一级链传动驱动捡拾装置逆时针回转作业、锯齿滚筒和螺旋输送器顺时针回转作业，二级链传动驱动脱棉装置逆时针回转作业，三级链传动驱动清杂毛刷逆时针回转作业。其中捡拾装置逆时针回转运动时，弹齿和皮条形成复合作业单元，通过旋转运动完成对地面和枝上棉花的捡抛作业。锯齿滚筒和清杂毛刷旋转方向相反，形成对向运动模式，在圆钢格条栅的配合下，可有效过滤掉棉秆、棉铃和棉叶等体积较大的杂质。脱棉装置将锯齿盘上钩住的棉花刷下并抛送到螺旋输送器中，螺旋输送器将棉花从两端聚拢到中间位置，并通过抛送板输送至后续清花机构中。通过上述工作部件的协同作用，该装置可以实现遗留棉的田间捡拾、杂质分离和物料输送连续化作业

流程。作业原理如图 2 所示。

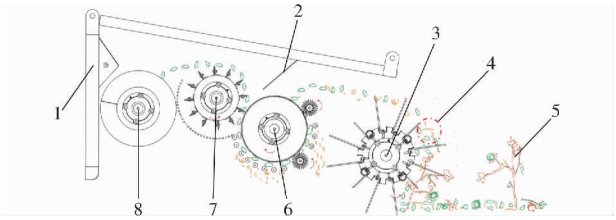


图 2 皮条-弹齿式遗留棉回收装置工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of the strap-spring tooth type residual cotton recycling device

1. 机架 2. 挡棉板 3. 捡拾装置 4. 棉杂混合物 5. 棉株 6. 锯齿清杂装置 7. 脱棉装置 8. 输送装置

2 捡拾滚筒设计与参数确定

2.1 捡拾滚筒设计

2.1.1 捡拾部件主要参数

捡拾部件主要由弹齿和皮条组成,二者呈圆周状均匀分布在捡拾滚筒上,协同作业。捡拾皮条选用韧性较好的布纹夹布橡胶板,与地面或棉秆接触时可延长寿命,且布纹夹布的摩擦力大、防滑效果好,可有效捡起落地棉;捡拾弹齿材质选用具有良好柔韧性、强度和耐磨性的 65Mn 合金弹簧钢,能够承受频繁的捡拾和抛送操作。为提升捡拾效率,皮条采用交错排列布置方式。捡拾部件的合理布置可以防止工作时产生干扰,同时有效覆盖捡拾区,减少漏捡情况发生。捡拾皮条和捡拾弹齿的主要参数见表 1。

表 1 捡拾弹齿与捡拾皮条主要参数

Tab. 1 Pickup gear and belt main parameters mm

捡拾弹齿参数	数值	捡拾皮条参数	数值
齿臂长	180	长度	310
弹簧中径	40	宽度	40
直径	6	厚度	7

2.1.2 捡拾滚筒结构设计

捡拾滚筒是影响遗留棉捡拾效果的核心工作部件,其结构由捡拾轴、连接圆盘、固定梁、捡拾皮条和捡拾弹齿等部件组成。如图 3 所示,固定梁固定于连接圆盘上,是以捡拾轴为圆心沿周向均匀设置的 12 根角钢。在固定梁和连接圆盘之间设有多个等间距的辅助圆盘,用于增强固定梁和连接圆盘之间的稳固性。根据实地调研遗留棉田间分布状态,通过数据采样及统计分析得出,枝上棉和落地棉残留量比例约为 1∶2,并结合实际工作效果,本研究将捡拾部件设计为 4 组捡拾弹齿和 8 组捡拾皮条的排列组合方式,且捡拾皮条长度大于捡拾弹齿长度,以确保对落地棉花和棉秆上棉花的高效捡拾。基于新疆地区机采棉宽窄行的种植模式和实际作业情况,将捡拾滚筒作业幅宽设计为 2 800 mm。

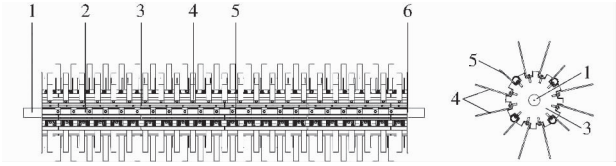


图 3 捡拾滚筒结构示意图

Fig. 3 Pickup drum structure diagram

1. 捡拾轴 2. 固定梁 3. 辅助圆盘 4. 捡拾皮条 5. 捡拾弹齿 6. 连接圆盘

2.2 捡拾作业动力学分析

2.2.1 接触捡拾阶段动力学分析

作业时,捡拾部件与地面或棉秆接触后会发生形变。弹齿与棉秆接触产生的形变较小,可忽略不计;而具有韧性的皮条与地面或棉秆接触时会发生明显形变,从而实现高低不平地面的仿形作业,避免卷起地膜和滴灌带,并减小对棉纤维的破坏。皮条通过恢复弹性变形过程中产生的拨动作用,结合捡拾滚筒的旋转,实现对遗留棉的有效捡拾。捡拾过程的受力包括惯性力 F_Z、棉秆或土壤的阻力 F_a,以及自身形变产生的弹力 F_T。设 θ 为皮条形变转角,其受力分析如图 4 所示。

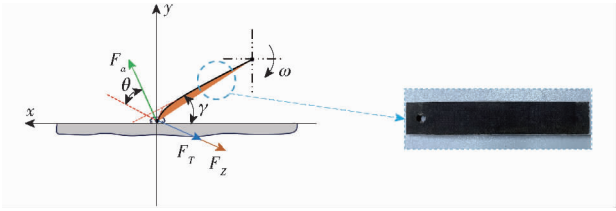


图 4 捡拾皮条对遗留棉的受力分析

Fig. 4 Schematic diagram of force analysis on residual cotton by pickup strap

为保证遗留棉能够被有效捡拾,接触捡拾阶段的遗留棉应能够进入护板覆盖区域内,因此需要对其进行运动分析。以捡拾弹齿为例,如图 5 所示。

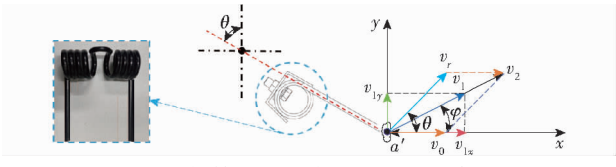


图 5 籽棉跟随弹齿运动方向示意图

Fig. 5 Diagram of seed cotton following direction of spring tooth movement

弹齿与遗留棉接触时的速度是由机具水平作业速度和捡拾滚筒旋转的分速度合成而来,即

$$\begin{cases} v_2 = v_r\cos(\theta-\varphi)+v_0\cos\varphi \\ v_r = 2\pi\omega R \end{cases} \tag{1}$$

式中 v_2——v_0 和 v_r 的合速度,m/s

v_r——弹齿端点的切向速度,m/s

v_0——机具作业速度，m/s

ω——捡拾滚筒角速度，rad/s

R——遗留棉回转半径，m

φ——v_1和 v_2的夹角，(°)

遗留棉与捡拾弹齿接触后，附着在捡拾弹齿上且速度和弹齿速度一致，可表示为

$$v_1 = Kv_2 \tag{2}$$

式中　K——常数

此时遗留棉水平速度分量 v_1和竖直速度分量 v_2分别为

$$\begin{cases} v_{1x} = v_1\cos\varphi = Kv_2\cos\varphi \\ v_{1y} = v_1\sin\varphi = Kv_2\sin\varphi \end{cases} \tag{3}$$

为保证捡拾的遗留棉能够被顺利抛送，即进入护板区域内，遗留棉跟随弹齿相对于初始点 a'的水平位移为 S_x时，相对于初始点 a'的竖直位移 S_y要大于距离 $R\cos\varphi$，如图 6 所示。

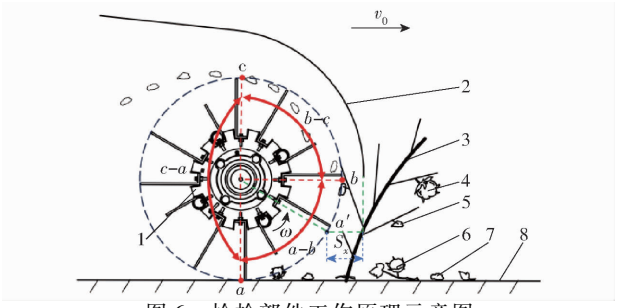


图 6　捡拾部件工作原理示意图

Fig. 6　Schematic of working principle of pickup parts

1. 捡拾滚筒　2. 护板　3. 棉株　4、5. 枝上棉　6、7. 落地棉　8. 地面

设水平位移 S_x的用时为 t，则 S_x和 t 的关系可表示为

$$S_x = (v_{1x} - v_0)t \tag{4}$$

$$t = \frac{S_x}{v_{1x} - v_0} = \frac{S_x}{Kv_2\cos\varphi - v_0} \tag{5}$$

则遗留棉跟随弹齿相对于初始点 a'的竖直位移 S_y与距离 $R\cos\phi$ 的关系为

$$S_y = v_{1y}t - \frac{1}{2}gt^2 = Kv_2\sin\varphi\frac{S_x}{Kv_2\cos\varphi - v_0} - \frac{1}{2}g\left(\frac{S_x}{Kv_2\cos\varphi - v_0}\right)^2 \geqslant R\cos\theta \tag{6}$$

式中　g——重力加速度，m/s^2

由式(6)可知，竖直位移 S_y与弹齿速度 v_2、机具作业速度 v_0有关，由此可知捡拾滚筒转速和机具作业速度是影响遗留棉回收效果的重要因素。

2.2.2　转移抛送阶段动力学分析

机具以速度 v_0匀速前进，捡拾滚筒以角速度 ω 匀速转动。以捡拾皮条为例，将籽棉视为一个质点，进一步分析在转移和抛送阶段的受力状态，如图 7 所示。

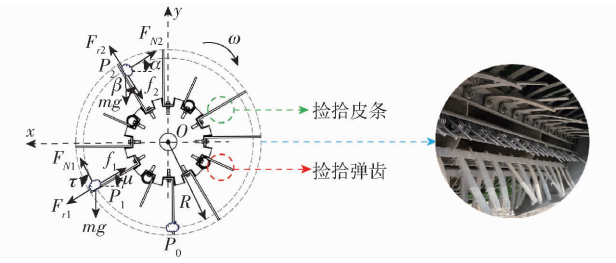


图 7　籽棉受力分析

Fig. 7　Seed cotton stress analysis diagram

(1)籽棉转移阶段动力学分析

籽棉被捡起后，在转移过程中主要受到离心力 F_{r1}、自身重力 mg、捡拾部件的摩擦力 f_1以及支持力 F_{N1}的影响。忽略空气阻力等其他作用力，籽棉在转移阶段不会掉落的条件为

$$\begin{cases} F_{N1}\cos\tau + F_{r1}\cos\mu - f_1\cos\mu = 0 \\ F_{N1}\sin\tau + f_1\sin\mu - F_{r1}\sin\mu - mg = 0 \\ f_1 = \eta F_{N1} \end{cases} \tag{7}$$

式中　τ——支持力与 x 轴的夹角，(°)

μ——向心力 F_{r1}和摩擦力 f_1与 x 轴之间的夹角，(°)

m——籽棉质量，kg

η——捡拾皮条与籽棉间的摩擦因数

将籽棉看作一质点，由加速度合成定理可得

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_r + \boldsymbol{a}_e + \boldsymbol{a}_c \tag{8}$$

式中　$\boldsymbol{a}$——质点在复合运动中的加速度，m/s^2

$\boldsymbol{a}_r$——相对加速度，m/s^2

$\boldsymbol{a}_e$——牵连加速度，m/s^2

$\boldsymbol{a}_c$——科里奥利加速度，m/s^2

由于机具作业速度可以视为匀速直线运动，因此 $a_e = 0$，$a_c = 0$，则

$$a = a_r = \omega^2 R \tag{9}$$

由牛顿第二定律可得

$$F_{r1} = ma = m\frac{v^2}{R} = m\omega^2 R \tag{10}$$

将上述关系式代入式(7)整理后得

$$\begin{cases} F_{N1}(\cos\tau - \eta\cos\mu) + m\omega^2 R\cos\mu = 0 \\ F_{N1}(\sin\tau + \eta\sin\mu) - m\omega^2 R\sin\mu - mg = 0 \end{cases} \tag{11}$$

联立整理得

$$\tan\mu = -\frac{F_{N1}(\sin\tau + \eta\sin\mu) - mg}{F_{N1}(\cos\tau - \eta\cos\mu)} \tag{12}$$

$$F_{N1} = \frac{m\omega^2 R(\sin\mu - \cos\mu) + mg}{\cos\tau - \sin\tau - \eta(\cos\mu + \sin\mu)} \tag{13}$$

上述参数与捡拾部件所处的捡拾位置相关，随着捡拾位置的变化而变化。

(2)籽棉抛送阶段动力学分析

籽棉在抛送过程中，忽略籽棉抛送过程中受到

的空气阻力和其他作用力,则籽棉能够被连续、稳定抛送条件为

$$\begin{cases} F_{N2}\cos\alpha + f_2\sin\beta - F_{r2}\sin\alpha > 0 \\ F_{N2}\sin\alpha + F_{r2}\cos\alpha - f_2\cos\beta - mg > 0 \end{cases} \tag{14}$$

式中 F_{N2}——支持力

F_{r2}——向心力

f_2——摩擦力

α——支持力 F_{N2} 与 x 轴的夹角,(°)

β——摩擦力 f_2 与 y 轴的夹角,(°)

化简得

$$\sqrt{\frac{mg - F_{N2}(\sin\alpha - \eta\cos\beta)}{mR\cos\alpha}} < \omega < \sqrt{\frac{F_{N2}(\cos\alpha + \eta\sin\beta)}{mR\sin\alpha}} \tag{15}$$

综上所述,为满足籽棉能够被连续、稳定抛送的条件,捡拾滚筒的角速度 ω 需要在合理范围内。

2.3 捡拾弹齿静力学分析

捡拾弹齿在工作过程中,随着捡拾滚筒做回转运动,在棉秆的反复冲击力和摩擦力作用下容易出现变形和断齿等现象。因此,有必要通过有限元仿真对弹齿和固定梁结构进行静强度校核,分析结构在外部载荷作用下的应力和应变。

2.3.1 模型构建与网格划分

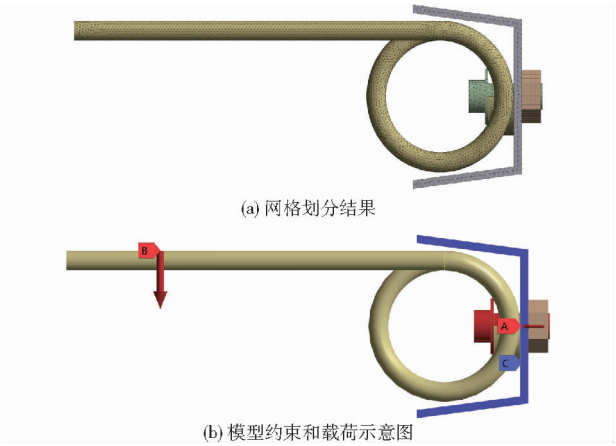
利用 Solidworks 软件创建捡拾弹齿的三维模型,对弹齿、固定梁和螺栓螺母等结构进行适当简化,并将文件保存为 step 格式。在 Ansys Workbench 软件中导入弹齿模型。根据设计定义各部件的材料属性,弹齿材料设为 65Mn 弹簧钢,固定梁材料设为 06Cr19Ni10,螺栓螺母材料设为 Q235[20]。各部件材料种类及属性[21]见表 2。

表 2 材料种类及属性参数

Tab. 2 Material type and property parameters

部件	材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
弹齿	65Mn	7 850	2.00×10^5	0.300	600
螺栓螺母	Q235	7 850	2.06×10^5	0.300	235
固定梁	06Cr19Ni10	7 950	1.97×10^5	0.282	275

为保证网格质量,对模型进行自由网格划分,确定固定梁和螺母螺栓网格尺寸为 1.5 mm,弹齿网格尺寸为 1 mm,网格划分结果如图 8a 所示。为模型设置接触:弹齿通过螺栓与固定梁连接,该处设置成摩擦接触,摩擦因数为 0.2。固定梁两端施加固定支撑约束,模拟捡拾滚筒的支撑状态。螺栓的圆柱面和螺母内侧圆柱面的接触为 Bonded,然后新建立一个坐标系,添加 Bolt Pretension,即添加一个螺栓预紧力。弹齿所承受的最大载荷为击碎棉秸秆的最大破坏力,集中在弹齿前端。查阅文献[22]可知,棉秸秆断裂的最大破坏力为 45 N,因此在弹齿前端添加 45 N 的集中载荷。模型添加约束和载荷的示意图如图 8b 所示。



(a) 网格划分结果

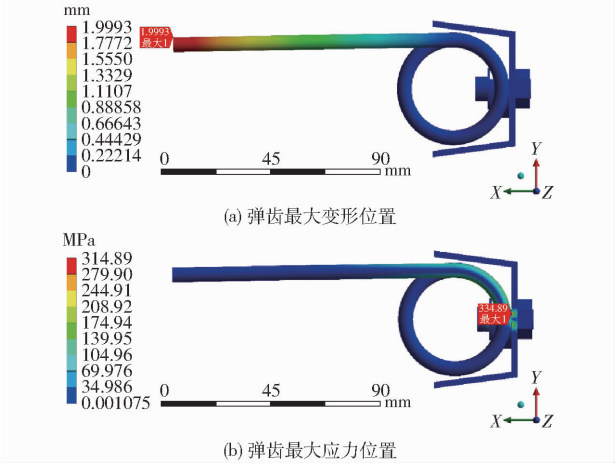
(b) 模型约束和载荷示意图

图 8 网格划分图与约束和载荷示意图

Fig. 8 Grid division and constraint and load diagram

2.3.2 静力学分析结果与分析

对模型进行求解,得到图 9 所示弹齿变形和等效应力云图,由图 9a 可知,弹齿最大变形位置为弹齿顶端,弹齿最大应力位置如图 9b 所示。



(a) 弹齿最大变形位置

(b) 弹齿最大应力位置

图 9 弹齿变形和应力云图

Fig. 9 Spring tooth deformation and stress nephogram

从图 9a 可以看出,由 A 端到弹齿顶端载荷逐渐增大,弹齿形变量逐渐增加,弹齿顶端处所受形变最大,最大值为 1.999 3 mm,处于弹齿设计允许范围内。

从图 9b 可以看出,应力最大的位置在弹齿弹簧圈和固定梁接触区域,最大应力为 314.89 MPa。已知构件工作时允许的最大应力,即许用应力可表示为构件屈服强度和材料安全系数的比值。65Mn 弹簧钢的屈服强度为 600 MPa,材料安全系数一般取 1.5,则许用应力[σ]为 400 MPa。弹齿所受最大应力小于其最小许用应力,即$[\sigma]_{\min} > \sigma_{\max}$。因此,弹齿的设计满足使用要求。

2.4　捡拾滚筒模态分析

机具在田间的工作环境复杂恶劣，捡拾滚筒在运行时可能受到多种动态激励影响，如机器运行产生的振动和地面不平引起的冲击等[23]。模态分析是基于结构动力学理论，能够揭示结构的振动特性，有助于了解捡拾滚筒在不同工况下的动态行为，包括求解结构的固有频率和对应的振型，为其优化设计和可靠运行提供指导[24]。

2.4.1　模型构建与网格划分

利用 Solidworks 软件创建捡拾滚筒的三维模型，确保各部件之间的配合关系准确无误。考虑到模态分析主要关注结构的整体动态特性，在保证有限元几何模型主要特征不变的情况下，可以对模型中的滚筒、固定梁、螺纹孔等结构进行合理简化，减少模型的计算规模，提高分析效率[25]。对简化后的模型进行干涉检查，确保无干涉现象后保存为 step 格式文件，并导入 Ansys Workbench 有限元分析软件中，各部件的材料种类及属性[21]如表 3 所示。

表 3　材料种类及属性参数

Tab. 3　Material type and property parameters

部件	材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
滚筒	Q235	7.85×10^{3}	2.06×10^{5}	0.3	2.35×10^{2}
轴头	45 号钢	7.85×10^{3}	2.06×10^{5}	0.3	3.55×10^{2}

对模型进行自动网格划分，将单元尺寸设置为 10 mm；而对于形状尺寸变化较大的关键部分，如安装孔、连接板和固定圆盘焊接处，需要在自动网格划分结束后通过“网格-尺寸调整”命令进行网格加密处理。点击“更新”命令后得到最新网格划分结果，如图 10 所示。网格划分共产生 616 313 个网格节点，涉及 293 666 个实体单元。随后在轴头两端的轴承安装部位分别添加固定支撑约束，模拟捡拾装置在实际工作过程中的支撑状态，整个模型未施加外力。

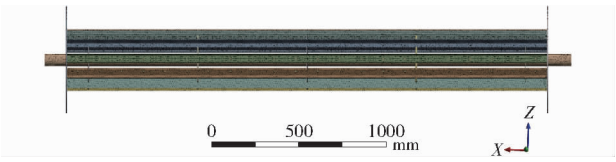


图 10　网格划分结果

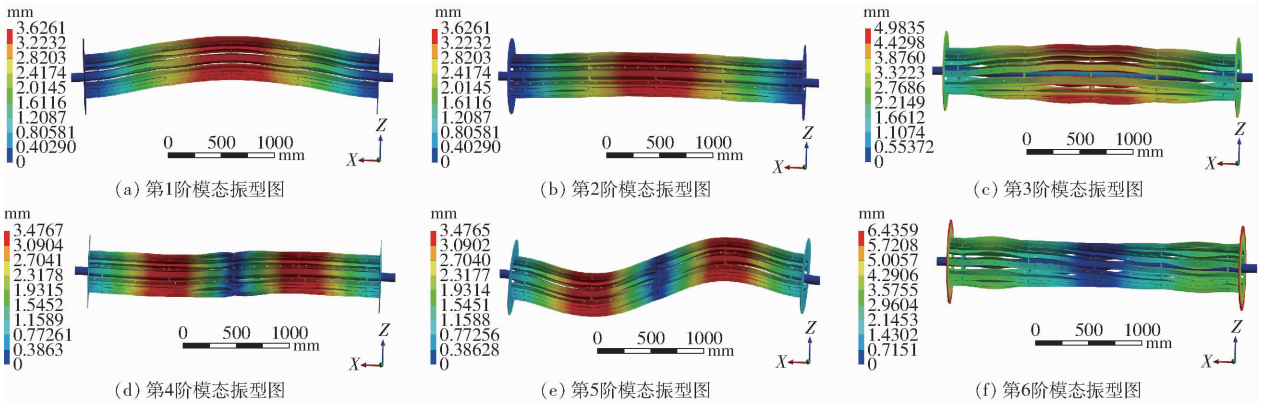
Fig. 10　Meshing result

2.4.2　模态求解结果与分析

鉴于低阶模态能量集中，与实际激励频率接近，振型简单直观且易观测，还能平衡计算成本与精度，本文重点对前 6 阶固有频率和振型进行分析，可为捡拾滚筒的结构优化提供依据。对模型进行求解，得到捡拾滚筒各阶固有振型结果如图 11 所示，各阶固定频率为 36.937、36.943、82.917、92.201、92.206、125.34 Hz。

分析图 11 中振型结果可以得到：在第 1 阶和第 2 阶模态振型中，捡拾滚筒整体发生弯曲振动，且中部振动较为明显，两端的振动相对较小，最大变形量为 3.626 1 mm；第 3 阶模态振型中，整个结构沿轴向有明显的波动变形，以弯曲振动为主，扭转振动不明显，这种轴向变形可能是由于结构在该模态下受到的激励导致的波动传播。最大变形处位于结构中间，最大变形量为 4.983 5 mm，平均变形量为 2.711 mm；第 4 阶和第 5 阶模态振型中，捡拾滚筒整体发生弯扭振动，最大变形处均对称分布在捡拾滚筒两端，最大变形量为 3.476 7 mm；第 6 阶模态振型中，捡拾滚筒整体在轴向方向上有明显的弯扭振动，最大变形位于两端的连接圆盘处，最大变形量为 6.435 9 mm，平均变形量为 2.078 9 mm。总体而言，捡拾滚筒整体变形程度较小，表明其结构具有良好的刚性和稳定性。

在固有频率方面，第 1 阶和第 2 阶的固有频率相近，第 4 阶和第 5 阶的固有频率相近，且振型也相似，只是振型方向各异。捡拾滚筒的设计工作转速为 250 r/min，换算成最大工作频率为 4.17 Hz，小于



(a) 第1阶模态振型图　(b) 第2阶模态振型图　(c) 第3阶模态振型图

(d) 第4阶模态振型图　(e) 第5阶模态振型图　(f) 第6阶模态振型图

图 11　捡拾滚筒前 6 阶模态振型图

Fig. 11　Mode shape diagrams of the pickup roller for each order

捡拾滚筒最低阶模态固有频率(36.937 Hz),因而不会导致共振。

3 试验

3.1 试验条件及方法

试验于 2024 年 10 月在新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州轮台县策大雅乡的机采后棉田进行。试验田种植的棉花品种为国欣棉 AW04。试验田长 700 m、宽 50 m,地势平坦、棉行间无障碍物,且地膜和滴灌带未回收。试验设备包括 145.5 kW 试验配套动力机具、数字转速表、高精度电子秤、钢卷尺、皮尺和标签纸等。试验棉田与配套动力机具如图 12 所示。



图 12 试验棉田与配套动力机具

Fig. 12 Test cotton fields and supporting power tools

在规划试验区域时,首先确定一个总长度为 700 m、总宽度为 5 倍作业幅宽的核心试验区。基于该区域选取若干个长为 100 m、宽为 1 个作业幅宽的采样单元。在采样单元正前方和正后方分别设置不小于 20 m 的准备区和停车区,以确保试验过程的平稳过渡。机具在试验区域按照设定的试验参数依次通过准备区和测定区,并最终停在停车区内。每组试验重复 3 次并记录数据。在整个过程中,机器不应换挡或改变作业速度,也不应停车或进行调整。图 13 展示了遗留棉回收机捡拾装置试验场景。



(a) 试验场景 (b) 作业前后对比

图 13 皮条-弹齿式遗留棉回收机捡拾装置试验场景

Fig. 13 Residual cotton recycling machine pickup device test site

3.2 试验因素与评价指标

为了优化试验设计并提高试验结果准确性和可靠性,本研究结合前期试验数据和实际操作经验,确定机具作业速度、捡拾滚筒转速以及捡拾皮条间距作为遗留棉回收机捡拾装置的关键试验因素。选择依据如下:机具作业速度直接影响单位时间内遗留棉的捡拾效率,进而对捡拾率产生显著影响。捡拾滚筒的转速水平决定了捡拾部件对遗留棉的捡拾与抛送效果,对遗留棉的捡拾率和质量具有重要影响。捡拾皮条间距与捡拾滚筒转速共同作用,影响遗留棉在捡拾装置内部的运动轨迹和分离效果,保障了遗留棉的有效捡拾及抛送过程。

为检验装置的作业性能,本文参考标准 NY/T 3214—2018《统收式棉花收获机作业质量》和 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》中的相关要求设计田间试验。同时,依据 GB/T 6499—2022《原棉含杂率试验方法》和 T/XJSAM 0003—2023《落地棉捡拾机操作规程》,确定落地棉捡拾率和枝上棉捡拾率作为试验指标。

(1)落地棉捡拾率

每组试验结束后,在采样区内交错选择 5 个测样点(每个测样点面积 2.8 m^2,作业幅宽 2.8 m,采样长度 1 m),人工收集测样点未被拾取的落地棉并称量记录,作为作业后落地棉总质量。同时,在试验区外随机选取 5 块同样大小的测样点,人工收集测区内所有的落地棉并称量记录,作为作业前落地棉总质量。

对取样数据进行整理,计算样本捡拾率

$$Y = \frac{m_z - m_d}{m_z} \times 100\% \tag{16}$$

式中 Y——落地棉捡拾率,%

m_z——作业前测样点内落地棉的总质量,g

m_d——作业后在地上未拾取的棉花质量,g

(2)枝上棉捡拾率

每组试验结束后,在采样区内交错选择 5 个测样点(每个测样点面积 2.8 m^2,作业幅宽 2.8 m,采样长度 1 m),人工收集测样点未被拾取的枝上棉并称量记录,作为作业后枝上棉总质量。同时,在试验区外随机选取 5 块同样大小的测样点,人工收集测区内所有的枝上棉并称量记录,作为作业前枝上棉总质量。枝上棉捡拾率计算式为

$$Z = \frac{m_l - m_g}{m_l} \times 100\% \tag{17}$$

式中 Z——枝上棉捡拾率,%

m_l——作业前测样点内枝上棉的总质量,g

m_g——作业后在枝上未拾取的棉花质量,g

机具作业前后落地棉、枝上棉取样场景如图 14 所示。

3.3 试验方案

各因素对试验效果有影响且呈非线性,采用响应曲面法构建模型。根据前期对皮条-弹齿式遗留棉回收捡拾装置的单因素试验结果,采用三因素三水平正交方法进行试验设计,试验因素编码如表 4 所示。



(a) 作业前取样场景　　(b) 作业后取样场景

图 14　机具作业前后落地棉、枝上棉取样场景

Fig. 14　Sample collection of residual cotton and hanging cotton on field before and after machinery operation

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Coding of experimental factors

编码	机具作业速度 A/(m·s^{-1})	捡拾滚筒转速 B/(r·min^{-1})	捡拾皮条间距 C/mm
-1	0.4	220	110
0	0.7	250	120
1	1.0	280	130

依据机具遗留棉捡拾机构的田间作业要求与效果，将落地棉捡拾率 Y 与枝上棉捡拾率 Z 作为响应值，对机具作业速度 A、捡拾滚筒转速 B、捡拾皮条间距 C 进行试验研究。

3.4　试验结果与参数优化

针对皮条-弹齿式遗留棉回收捡拾装置的作业要求，根据遗留棉捡拾机构的结构与工作参数，将落地棉捡拾率 Y 与枝上棉捡拾率 Z 作为响应值，按照三因素三水平 Box－Behnken 响应面分析试验设计方法对机具作业速度 A、捡拾滚筒转速 B、捡拾皮条间距 C 进行试验研究，试验结果如表 5 所示。

表 5　试验设计与结果

Tab. 5　Experimental design and results

试验序号	试验因素			落地棉捡拾率 Y/%	枝上棉捡拾率 Z/%
	机具作业速度 A/(m·s^{-1})	捡拾滚筒转速 B/(r·min^{-1})	捡拾皮条间距 C/mm		
1	1.0	250	110	88.1	88.2
2	1.0	280	120	88.8	88.9
3	1.0	250	130	88.7	88.9
4	0.7	250	120	90.1	90.2
5	0.4	220	120	86.7	86.9
6	0.7	220	130	87.5	87.4
7	0.4	250	110	87.4	87.9
8	1.0	220	120	88.1	87.6
9	0.7	220	110	86.9	87.1
10	0.7	250	120	90.3	90.2
11	0.4	280	120	89.1	89.2
12	0.7	250	120	90.1	89.9
13	0.4	250	130	87.8	88.1
14	0.7	250	120	90.6	90.5
15	0.7	250	120	90.0	90.2
16	0.7	280	110	87.8	88.1
17	0.7	280	130	88.3	88.4

3.4.1　模型建立与显著性检验

通过 Design-Expert 10.0 软件对表 5 中的数据进行多元线性回归拟合及方差分析，结果如表 6 所示，并建立落地棉捡拾率 Y 与枝上棉捡拾率 Z 对机具作业速度、捡拾滚筒转速、捡拾皮条间距的二次多项式响应回归模型。对落地棉捡拾率 Y 的数据分析可知，在 $P<0.05$ 水平上，A、B、A^2、B^2、C^2 影响极显著，C、AB 影响显著，其余不显著。该模型 $P<0.000\,1$，说明以落地棉捡拾率 Y 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性，失拟项 $P=0.318\,1$，失拟项不显著，回归模型方程具有高度的拟合性，回归方程为

$$Y=90.22+0.34X_1+0.6X_2+0.26X_3-0.43X_1X_2-0.84X_1^2-1.21X_2^2-1.38X_3^2 \quad (18)$$

式中　X_1、X_2、X_3——因素编码值

表 6　方差分析

Tab. 6　Analysis of variance

试验指标	方差来源	平方和	均方	F	P
落地棉捡拾率	模型	24.16	2.68	37.18	<0.000 1
	A	0.911 3	0.911 3	12.62	0.009 3
	B	2.88	2.88	39.88	0.000 4
	C	0.551 2	0.551 2	7.63	0.028 0
	AB	0.722 5	0.722 5	10.00	0.015 9
	AC	0.010 0	0.010 0	0.138 5	0.720 8
	BC	0.002 5	0.002 5	0.034 6	0.857 7
	A^2	2.94	2.94	40.65	0.000 4
	B^2	6.18	6.18	85.37	<0.000 1
	C^2	8.08	8.08	111.84	<0.000 1
	残差	0.505 5	0.072 2		
	失拟项	0.277 5	0.092 5	1.62	0.318 1
	误差	0.228 0	0.057 0		
枝上棉捡拾率	模型	21.59	2.40	29.32	<0.000 1
	A	0.281 3	0.281 3	3.44	0.106 1
	B	3.92	3.92	47.93	0.000 2
	C	0.281 3	0.281 3	3.44	0.106 1
	AB	0.250 0	0.250 0	3.06	0.123 9
	AC	0.062 5	0.062 5	0.764 2	0.411 0
	BC	0	0	0	1.000 0
	A^2	2.45	2.45	29.93	0.000 9
	B^2	6.98	6.98	85.34	<0.000 1
	C^2	5.69	5.69	69.57	<0.000 1
	残差	0.572 5	0.081 8		
	失拟项	0.392 5	0.130 8	2.91	0.164 6
	误差	0.180 0	0.045 0		

对枝上棉捡拾率 Z 的数据分析可知，在 $P<0.05$ 水平上，B、A^2、B^2、C^2 影响极显著，其余不显著。该模型 $P<0.000\,1$，说明以枝上棉捡拾率 Z 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性，失拟项 $P=0.164\,6$，失拟项不显著，回归模型方程具有高度的

拟合性,回归方程为

$$Z = 90.2 + 0.19X_1 + 0.7X_2 + 0.19X_3 - 0.76X_1^2 - 1.29X_2^2 - 1.16X_3^2 \quad (19)$$

3.4.2 试验因素对落地棉捡拾率的影响

利用 Design-Expert 10.0 进行数据分析并生成 3D 响应曲面图,通过分析各项系数确定各因素对机具落地棉捡拾率 Y 的影响,得出各因素对落地棉捡拾率 Y 的影响重要性依次为捡拾滚筒转速 B、机具作业速度 A、捡拾皮条间距 C。为更直观判断各因素对机具落地棉捡拾率 Y 的影响趋势,通过固定一个试验因素处于零水平,研究其余两个因素间的交互效应,由表 6 和式(18)可以看出,AC 和 BC 的 P 值大于 0.05,对机具落地棉捡拾率 Y 不具有显著影响,图 15 为显著性参数交互作用对机具落地棉捡拾率的响应曲面。

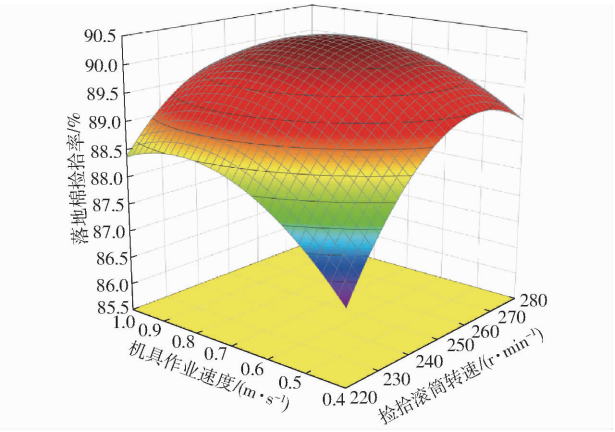


图 15 因素交互作用对落地棉捡拾率影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface of effect of interaction of factors on pickup rate of residual cotton

当捡拾滚筒转速稳定不变时,随着机具作业速度的增加,机具的落地棉捡拾率 Y 呈先增大后减小的趋势,当捡拾皮条间距为 120 mm 时,机具作业速度在 0.74 m/s、捡拾滚筒转速在 255 r/min 附近时,可获得落地棉最高捡拾率,为 90.6%。

3.4.3 参数优化

遗留棉捡拾是捡拾回收作业的关键环节,捡拾率是反映遗留棉捡拾回收效果最重要的指标,在试验范围内要求其越大越好,应用 Design-Expert 10.0 的寻优功能对遗留棉捡拾机构的结构进行优化,得机具作业速度 0.74 m/s、捡拾滚筒转速 257.3 r/min、捡拾皮条间距 120.9 mm 时性能最优,此时落地棉捡拾率为 90.32%,枝上棉捡拾率为 90.31%。

4 田间试验

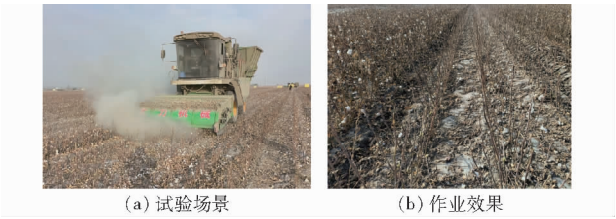
为验证参数优化结果的可靠性,对皮条-弹齿式遗留棉捡拾回收装置试验中最优参数进行验证。考虑试验的可行性,将机具作业速度圆整为 0.7 m/s、捡拾滚筒转速 260 r/min、捡拾皮条间距 120 mm。

2024 年 11 月 14—16 日,遗留棉捡拾回收装置在新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州轮台县策大雅乡棉田进行。试验时棉花已机械采收,地膜和滴灌带未回收,棉株上和地面上有一定量遗留棉。进行 5 次重复试验,并取试验结果平均值,结果如表 7 所示,皮条-弹齿式遗留棉捡拾回收装置田间试验作业效果如 16 所示。试验测得落地棉捡拾率均值为 90.01%,枝上棉捡拾率均值为 89.76%,比理论预测值分别降低 0.31、0.55 个百分点。试验验证结果表明,回归模型具有较好的可靠性。

表 7 田间试验结果

Tab. 7 Field trial results %

序号	落地棉捡拾率 Y	枝上棉捡拾率 Z
1	89.12	88.65
2	90.87	90.70
3	89.63	89.34
4	90.51	91.18
5	89.92	88.93
平均值	90.01	89.76



(a) 试验场景 (b) 作业效果

图 16 遗留棉回收机捡拾装置试验

Fig. 16 Residual cotton recycling machine pickup device test site picture

WANG 等[14]设计的锯齿式落地棉回收装置田间试验捡拾率为 79.09%;成波[15]设计的牵引式落地棉捡拾机田间试验平均落地棉捡拾率为 86.38%。本研究设计的皮条-弹齿式遗留棉捡拾回收装置平均落地棉捡拾率为 90.01%,相较于前者落地棉捡拾率分别提升了 10.92、3.63 个百分点,具有一定的作业性能优势。

5 结论

(1)设计了一种皮条-弹齿式遗留棉回收装置,阐述了其结构组成,以及皮条-弹齿滚筒捡拾和锯齿滚筒清杂-脱棉输送的工作原理。

(2)明确了其关键部件捡拾滚筒的结构方案与参数设计,并采用动力学与运动学分析开展了理论研究。通过静力学仿真分析,对捡拾滚筒及其关键部件弹齿开展了校核分析,验证了结构稳定性。

(3)通过多因素试验与模型优化,得到优化后皮条-弹齿式遗留棉回收装置工作的最优参数组合为:机具作业速度 0.7 m/s、捡拾滚筒转速 260 r/min、捡拾皮条间距 120 mm。通过田间验证试验得到了该装置参数优化后的落地棉捡拾率为 90.01%,枝上棉捡拾率为 89.76%,满足遗留棉捡拾的作业要求。

参 考 文 献

[1] 苑严伟,白圣贺,牛康,等.棉花种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023, 39(6): 1-11.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 1-11. (in Chinese)

[2] 成波,邢剑飞,郭文松,等. 新疆落地棉捡拾收获现状与对策研究[J]. 新疆农机化,2023(2): 29-33.
CHENG Bo, XING Jianfei, GUO Wensong, et al. Study on present situation and countermeasures for falling cotton harvest in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(2): 29-33. (in Chinese)

[3] 王智,李勇辉,杨召恩,等. 我国棉花产业生物育种和创新利用的发展与展望[J]. 农业生物技术学报,2025, 33(3): 650-658.
WANG Zhi, LI Yonghui, YANG Zhaoen, et al. Development and perspective of biological breeding and innovation uilization in cotton industry in China[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2025, 33(3): 650-658. (in Chinese)

[4] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2025.

[5] 毛树春,李鹏程,程思贤,等.新疆绿洲棉花发展的成就、贡献、经验与展望—写在新疆维吾尔自治区成立 70 周年之际[J].中国棉花,2025,52(10):1-17.
MAO Shuchun, LI Pengcheng, CHENG Sixian, et al. Achievements, contributions, experiences, and perspective of cotton production in Xinjiang Oasis—on the occasion of the 70th anniversary of the establishment of the Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. China Cotton, 2025, 52(10): 1-17. (in Chinese)

[6] 黄铭森,石磊,张玉同,等. 刷辊式采棉机的改进设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(20):41-47.
HUANG Mingsen, SHI Lei, ZHANG Yutong, et al. Revised design and experiments on brush-rolling cotton harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 41-47. (in Chinese)

[7] 棉花收获机:GB/T 21397—2023[S]. 2023.

[8] 李海洋,王玉刚,傅秀清,等. 田间作业条件下摘锭耐磨性能及棉花采净率的试验研究[J]. 农业工程学报,2023, 39(7): 89-97.
LI Haiyang, WANG Yugang, FU Xiuqing, et al. Experimental study on the wear resistance of spindle and cotton total harvest rate under field conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7): 89-97. (in Chinese)

[9] 徐玉龙,班婷,阿力木·买买提吐尔逊,等. 牧神 4MJZ-3600 型自走式落地棉花收获机的研制[J]. 新疆农机化,2024(5): 16-19.
XU Yulong, BAN Ting, ALIMU·Maimaituerxun, et al. Development of moshine 4MJZ-3600 self-propelled ground cotton harvester[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2024(5): 16-19. (in Chinese)

[10] 王磊,张宏文,刘巧. 胶棒滚筒棉花采摘头采收性能试验[J].农业工程学报,2016,32(18):35-41.
WANG Lei, ZHANG Hongwen, LIU Qiao. Test on harvest performance of cotton picking head with rubber-bar roller[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 35-41. (in Chinese)

[11] BREWSTER L A. Cotton salving apparatus: US. Patent 3, 039, 257[P]. 1962-06-19.

[12] BUROMSKY V, BOGDANOVA L, LISTOV P, et al. A machine for picking up cotton from ground: SU19721759981[P]. 1976-12-18.

[13] LAWRENCE A. Ground cotton retriever with dual cleaning means: US19830566046[P]. 1985-02-05.

[14] WANG Hezheng, CAO Silin, LIU Yongrui, et al. Design of cotton recovery device and operation parameters optimization[J]. Agriculture, 2022, 12:1296.

[15] 成波. 牵引式落地棉捡拾机的设计与试验[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2024.
CHENG Bo. Design and experiment of tractor type landing cotton pick-up machine[D]. Alar: Tarim University, 2024. (in Chinese)

[16] 胡进军. 一种可采落地棉的采棉机:114467493A[P]. 2022-05-13.

[17] 霍德义,赵歧伟,曹山田. 一种大型落地棉花拾取装置:215912582U[P]. 2021-08-01.

[18] 袁小伟,付温平,吕慧捷. 一种落地棉捡拾机构:217183923U[P]. 2022-08-16.

[19] 朱贞. 一种用于棉花加工的落地棉风机:216218854[P]. 2021-11-12.

[20] 刘志远. 菜用大豆联合收获采摘装置优化设计与试验[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
LIU Zhiyuan. Optimal design and experiment of picking device for vegetable soybean combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. (in Chinese)

[21] 成大先. 机械设计手册:第 1 卷[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.

(下转第 54 页)

[26] PEREZ-PORRAS F J, TORRES-SANCHEZ J, LOPEZ GRANADOS F, et al. Early and on-ground image-based detection of poppy in wheat using YOLO architectures[J]. Weed Science, 2023, 71(1): 50 – 58.
[27] 范迎迎, 钱育蓉, 杨柳, 等. 基于 BP 神经网络的遥感影像棉花识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(5): 1356 – 1360.
FAN Yingying, QIAN Yurong, YANG Liu, et al. Cotton recognition method for remote sensing images based on BP neural network[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(5): 1356 – 1360. (in Chinese)
[28] 韩鑫, 韩金鸽, 陈允琳, 等. 基于顶芽智能识别的棉花化学打顶系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 145 – 152.
HAN Xin, HAN Jin'ge, CHEN Yunlin, et al. Research on cotton chemical topping system based on intelligent recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 145 – 152. (in Chinese)
[29] 李建亮, 支辛蕾, 曹清政, 等. 基于立体视觉测量的棉花顶芽识别定位技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(3): 43 – 45,49.
LI Jianliang, ZHI Xinlei, CAO Qingzheng, et al. Research on recognition and positioning technology of cotton apical buds based on stereo vision measurement[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2021(3): 43 – 45,49. (in Chinese)
[30] 刘海涛, 韩鑫, 兰玉彬, 等. 基于 YOLO v4 网络的棉花顶芽精准识别方法[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(8): 99 – 108.
LIU Haitao, HAN Xin, LAN Yubin, et al. A precision recognition method for cotton apical buds based on the YOLO v4 network[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(8): 99 – 108. (in Chinese)
[31] SONG P, CHEN K Y, ZHU L F, et al. An improved cascade R – CNN and RGB – D camera-based method for dynamic cotton top bud recognition and localization in the field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202:107442.
[32] 彭炫, 周建平, 许燕, 等. 改进 YOLO v5 识别复杂环境下棉花顶芽[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 191 – 197.
PENG Xuan, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Improved YOLO v5 for cotton apical bud recognition in complex environments [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 191 – 197. (in Chinese)
[33] 郝延杰, 石磊, 曹龙龙, 等. 棉花顶芽识别定位技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(11): 72 – 78.
HAO Yanjie, SHI Lei, CAO Longlong, et al. Research status and prospect of cotton apical bud recognition and positioning technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(11): 72 – 78. (in Chinese)
[34] 席光泽, 周建平, 许燕, 等. 基于改进 YOLO v5s 的复杂环境下棉花顶芽识别[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 275 – 280.
XI Guangze, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Recognition of cotton apical buds in complex environments based on an improved YOLO v5s model[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 275 – 280. (in Chinese)
[35] ZHANG X, CHEN L. Bud – YOLO: a real-time accurate detection method of cotton top buds in cotton fields[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1651.

(上接第 33 页)

[22] 尹益文. 棉杆切碎还田装置的设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
YIN Yiwen. Design and experimental research of the cotton stalk chopper[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[23] 徐竹凤,薛新宇,崔龙飞,等. 农田地面振动谱的研究综述[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 251 – 255.
XU Zhufeng, XUE Xinyu, CUI Longfei, et al. Review on farmland ground vibration spectrum [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(7):251 – 255. (in Chinese)
[24] 王光恒, 林慧, 王玉刚, 等. 采棉机机架模态分析与优化[J]. 中国农机化学报, 2024, 5(6): 63 – 71.
WANG Guangheng, LIN Hui, WANG Yugang, et al. Modal analysis and optimization design of cotton picker frame[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 63 – 71. (in Chinese)
[25] 郑秀宏, 张沙清, 李柏燐. 双转盘式嫁接机结构设计与模态分析[J]. 机电工程技术, 2018, 47(12): 60 – 62, 160.
ZHENG Xiuhong, ZHANG Shaqing, LI Bolin. Research on structural design and modal analysis of the double-turntable grafting machine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(12): 60 – 62, 160. (in Chinese)