

变刚度夹拔式棉秆整株拔取装置设计与试验

赵维松^{1,2,3}, 谢建华^{1*}, 陈明江^{2,3}, 高琪珉², 曹肆林^{1,4}, 王振伟², 陈永生^{2,3}

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014;
3. 中国农业科学院西部农业研究中心, 昌吉 831100; 4. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

摘要: 针对现有棉秆夹持拔取装置存在的夹断率高、拔净率低等问题, 该研究设计了一种变刚度夹持拔取装置, 利用橡胶的柔顺性改善棉秆被夹断的不良现象, 并采用刚性外骨骼增大夹持力防止棉秆滑脱漏拔, 实现棉秆的整株拔取收获。该装置由分禾盘、变刚度夹拔机构、张紧导轨机构等部分组成。通过分禾过程、夹持过程和拔秆过程分析, 确定了分禾盘结构参数, 确定变刚度夹块的橡胶块厚度为 10 mm、柔性变形宽度为 23 mm, 夹持链中心距长度为 1 225 mm, 并解析影响拔取效果的关键参数; 通过棉秆与夹持器的相互作用力学分析发现棉秆的夹持应力沿棉秆外径呈周向规律性非均匀分布特征。采用响应曲面法分析机具前进速度、链轮转速和预紧力对变刚度夹拔装置作业性能的影响。试验结果表明, 当机具前进速度为 0.68 m/s, 链轮转速为 95 r/min、预紧力为 1 792 N 时, 棉秆拔净率为 94.70%, 拔净率实测值与模型预测值的相对误差为 1.67%; 相比现有夹持拔取装置的漏拔率 (5.19%) 和拔断率 (3.68%), 变刚度夹持拔取装置的漏拔率 (3.99%) 和拔断率 (1.32%) 分别降低 23.1% 和 64.13%。研究结果可为棉秆整株拔取收获机的研发提供理论依据和参考。

关键词: 农业机械; 秸秆; 棉花; 变刚度夹持; 拔取; 响应面

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406001

中图分类号: S225.91⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0080-11

赵维松, 谢建华, 陈明江, 等. 变刚度夹拔式棉秆整株拔取装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 80-90. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202406001 <http://www.tcsae.org>

ZHAO Weisong, XIE Jianhua, CHEN Mingjiang, et al. Design and experiments of the clamping and uprooting device with adjustable stiffness for a cotton stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 80-90. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是世界棉花主产地之一, 2022 年全国种植面积 ($3 \times 10^6 \text{ hm}^2$) 居全球第三, 棉秆资源量十分丰富^[1]。棉秆是优质的生物质资源, 具有建筑板材、化工产品原料 (如乙醇、羧甲基纤维素)、燃料和造纸等广泛应用场景^[2-5], 棉秆综合利用是加快农业绿色低碳发展的重要举措, 机械化收获是其高效离田的必由之路。因此, 开展棉秆机械化收获势在必行。当前, 棉花广泛采用覆膜滴灌种植模式^[6], 棉秆不连根拔取容易导致棉花病虫害显著加剧^[7]、播种机作业质量降低^[8]、土壤残膜污染加重和回收残膜的含杂率增加等问题^[9]日益突出, 棉秆连根拔取后再处置可有效解除上述隐患。因此, 无论是科学还田还是高效离田, 连根拔取装置都是棉秆机械化收获装备的关键。

国内外学者围绕棉秆连根拔取装置已开展大量研究,

取得良好进展。国外主要采用橡胶/轮胎对辊夹持拔取技术^[10], 历经近 40 年的发展^[11-12], 当前美国 Amadas 公司已研制出轮胎对辊式棉秆拔除/粉碎机, 将棉秆拔除后立即打碎, 实现了棉秆整株拔除与粉碎还田一体化作业, 不仅解决了轮胎发热失效问题, 而且作业速度快, 最高可达 5.33 m/s, 主要适用于国外大单行标准化种植模式, 适应的最小行距为 914.4 mm^[13]。然而, 中国广泛采用宽窄行间隔机采棉模式 (660 mm+100 mm), 种植模式的差异导致该机型无法直接应用。

国内学者在吸收国外先进技术经验基础上, 进行了自主创新研究, 主要有对行拔取和不对行拔取两种方法, 涉及齿辊式、对辊式、夹持辊式、铲拔式等多种结构形式。

国内学者在吸收国外先进技术经验基础上, 进行了自主创新研究^[14-15]。其中不对行拔取方法涉及齿辊式^[16]、横轴对辊式^[17]、夹持辊式^[18]等, 对行拔取方法涉及链夹式^[19]、皮带夹持式^[20]等。然而, 中国密植棉花茎秆细小、拔取阻力大, 并且破土降阻方式易对后续残膜回收产生不利影响, 整株直接拔取面临的棉秆断裂率高问题尚待解决。造成这一问题的主要原因之一是: 目前研究主要关注拔取装置的整体设计, 对夹持器与棉秆互作关系研究不足, 目前国内相关拔秆装置的夹持部件多为刚性介

收稿日期: 2024-06-01 修订日期: 2024-08-01

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2022B02033)

作者简介: 赵维松, 博士生, 助理研究员, 研究方向为农业生产废弃物收集处理技术和装备。Email: wszhao77@163.com

*通信作者: 谢建华, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业固体废弃物回收机械装备研究。Email: xjh199032@163.com

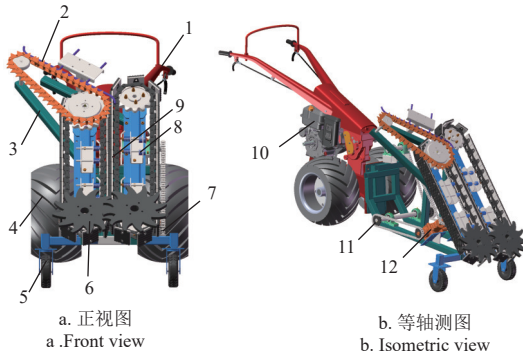
质, 柔顺性差, 局部载荷过大导致棉秆受夹/剪断裂。为了减少棉秆夹持断裂, 新疆农业大学张佳喜老师团队开展了柔性带夹持装置的研究, 采用橡胶带夹持减少棉秆断裂率^[21]。虽然柔性夹持克服了刚性夹持刚性大易损伤的缺陷, 但柔性夹持的普遍问题是夹持力不足^[22]。为了提升橡胶带的夹持力往往需要增大预紧力, 但橡胶带同时作为传动部件, 过度摩擦致使部件发热失效问题频发。为了既保证柔性低损伤夹持, 又提供充足夹持力, “刚柔并济”型变刚度夹持器应运而生, 已成为医疗、工农业生产中自动化抓取等领域的研究热点^[23-24]。

为此, 基于人工拔秆的启发, 对柔性夹持介质添加外骨骼结构, 设计变刚度夹持器, 实现对棉秆周向的柔性包裹夹持, 并可获取充足夹持力, 以此减少棉秆断裂、捋皮滑脱等不利现象, 提升棉秆整株拔取作业质量。

1 整机结构与工作原理

1.1 台架整体结构

为了便于试验研究的顺利开展, 设计了单行棉秆拔取试验台架, 主要用于变刚度夹持拔取装置结构的试验研究及参数寻优。变刚度夹拔式棉秆整株拔取试验台架整体结构如图 1 所示, 主要由变刚度夹拔装置、输送排秆装置、张紧导向机构、分禾盘和机架等组成。



1. 扶手 2. 输送排秆装置 3. 机架 4. 手扶机轮胎 5. 从动轮 6. 分禾盘 7. 传动链 8. 张紧导向机构 9. 变刚度夹拔装置 10. 动力源 11. 传动链轮链条 12. 直角导向变速箱
1. Handrail 2. Straw conveying and discharging device 3. Frame 4. Walk-behind tire 5. Follower wheel 6. Dividing disc 7. Transmission chain 8. Tension Guiding mechanism 9. Variable stiffness clamping and pulling device 10. Power source 11. Transmission sprocket chain 12. Right-angle guiding gear box

图 1 台架整体结构

Fig.1 Overall structure of the test bench

1.2 工作原理与技术参数

棉秆拔取阻力通常为 500~800 N, 最高可达 1 000 N^[25], 相较于菠菜^[26]、大蒜^[27] 等作物收获的特点 (拔取力小, 易拔取, 主要需求为低损伤), 棉秆拔取存在阻力大、可损伤、不可完全断裂的特点 (只要不产生断裂留茬, 局部损伤或不完全断裂对于棉秆整株收获是可接受的, 主要需求为可接受损伤范围内的大拔取力。)。棉秆夹持拔取的基本工作原理为拉拔收获原理, 拔秆作业过程为喂入-夹持-拔取, 如图 2 所示。

工作时, 由左、右两个上下重叠安装的分禾盘实现棉秆的有序喂入, 随后棉秆被变刚度夹持器稳固夹持,

并在机器前向运动和链条斜向上复合运动下, 实现棉秆拔取作业。被拔取的棉秆在尖齿链和可伸缩导杆的作用下, 完成侧向排秆铺放。

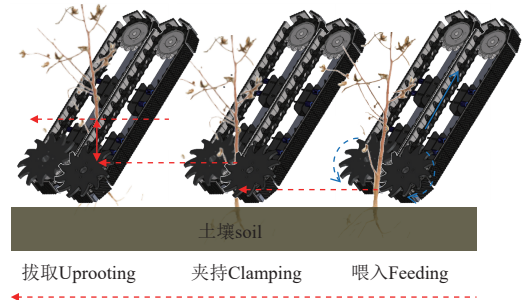


图 2 棉秆夹持拔取作业过程

Fig.2 The process of clamping and uprooting cotton stalk

如图 3a 所示, 现有柔性夹持多采用柔性带^[28] 进行夹持, 最大优点是可降低对夹持物的损伤, 在蔬菜等小拔取力需求的作物应用效果好。刚性夹持 (图 3b) 可以更容易获取大夹持力, 但棉秆径向抗压强度低^[29], 在非结构化作业环境中保证棉秆不断裂的难度较大。变刚度夹持 (图 3c) 的基本原理是采用柔性夹块直接接触棉秆, 利用刚性外支撑提高夹持力, 兼顾柔性夹持和刚性夹持的优点。变刚度夹持器作业特点: 其一是实现对棉秆的全包裹夹持, 橡胶块刚度小、柔性大、变形能力优于棉秆而次于外侧钢板, 在大夹持力下, 较厚的橡胶块可将夹持区棉秆全部包裹, 接触面积大 (柔性夹持多为局部接触, 刚性夹持多为点接触或线接触), 稳定性好。其二是采用多组夹持器与链轮链条机构结合的方式, 解决困扰带式夹持的张紧问题; 夹块作为夹持部件, 不与链轮直接接触, 仅与棉秆摩擦, 无橡胶发热失效问题。

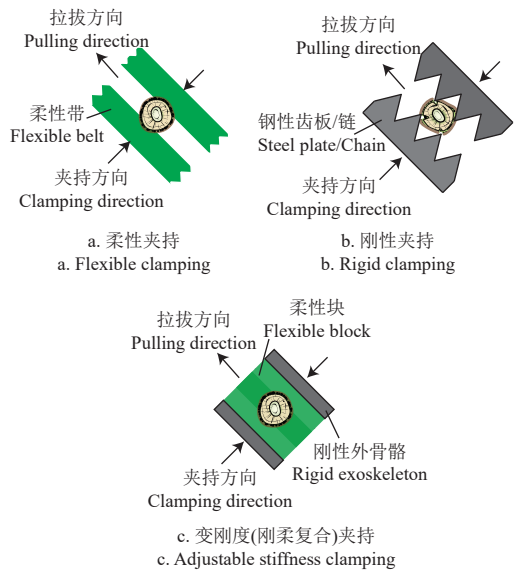


图 3 夹持原理示意图

Fig.3 Clamping principle schematic

试验台架挂载在手扶拖拉机 (型号 CS178FS) 前, 由发动机动力输出轴引出动力, 经多级链传动、直角导向器变速箱 (速比 1:1) 驱动夹持链运动, 主要参数如

表 1 所示。

表 1 台架主要参数

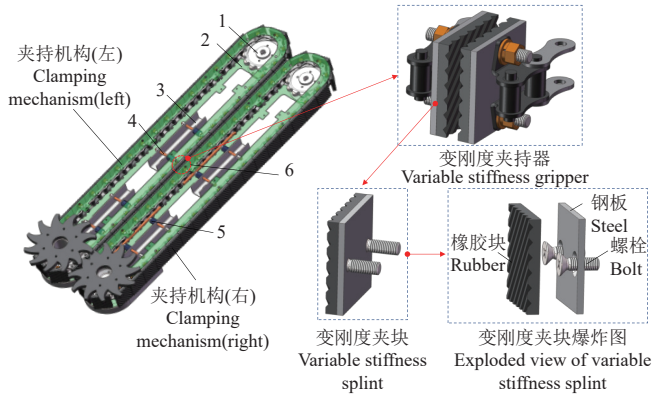
Table 1 Main Parameters of the device

参数 Parameters	数值 Value
发动机额定功率 Rated power of engine/kW	4.3
外形尺寸 (长×宽×高) Overall dimensions (length×width×height)/ (mm×mm×mm)	1 400×455×1 100
整机质量 Machine mass/kg	176
收获行数 Harvest rows	1
作业速度 Operation speed/ (m·s ⁻¹)	0.38~1.06

2 关键结构设计

2.1 变刚度夹拔装置结构

变刚度夹拔装置是试验台架的核心，如图 4 所示，主要由主动链轮、变刚度夹持器、张紧导轨等部件组成，变刚度夹持机构左右对称布置。夹持链采用玉米收获机专用链条，节距为 38.1 mm，平均拉伸载荷 127 kN，抗拉强度高，通用性好。链条两侧采用弯板设计，作为底座与变刚度夹块进行连接，采用螺母进行固定。变刚度夹块由橡胶块、钢板、螺栓组成，橡胶块与钢板之间进行胶接。橡胶块与棉秆接触表面采用斜纹设计，增大摩擦系数。根据夹持链上弯板的外形尺寸，设计变刚度夹块的钢板长和宽均为 75 mm，钢板厚度为 5 mm。



1. 主动链轮 2. 护板 3. 张紧导轨底座 4. 张紧导轨 5. 张紧弹簧 6. 变刚度夹持器
1. Active sprocket 2. Guard plate 3. Tension guide base 4. Tension guide 5. Tension spring 6. Variable stiffness gripper

图 4 变刚度夹持装置

Fig.4 Variable stiffness clamping device

2.1.1 分禾盘结构及夹持过程分析

如图 5 所示，作业时，为了将棉秆有序、单株导向夹持机构，且在该过程中不推倒或折断棉秆，需要对棉秆喂入过程进行分析。

分禾盘拨秆速度 v_l 与机具前进速度 v_m 之间的关系为

$$v_l = \frac{v_m}{\cos \alpha} \quad (1)$$

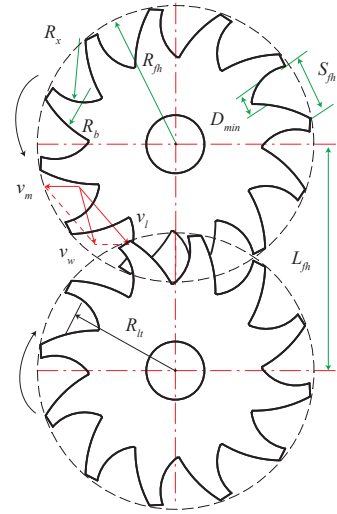
根据图 5 几何关系可得：

$$v_w = v_l \sin(\gamma + \beta) - v_l \sin \beta \quad (2)$$

$$v_l \cos(\gamma + \beta) = v_l \cos \beta \quad (3)$$

式中 α 为割台与地面夹角，设计值为 45°； γ 为 v_l 与机具前进方向的夹角，(°)； β 为 v_w 与机具前进方向垂线间

的夹角，(°)。



注： v_l 为分禾盘线速度，m·s⁻¹； v_m 为机具前进速度，m·s⁻¹； v_w 为分禾盘与棉秆接触点的合速度，m·s⁻¹； R_b 和 R_x 为分禾盘两侧开口圆弧半径，mm； S_{fh} 和 D_{min} 分别为开口最大值和最小值，mm； R_{fh} 为分禾盘外径，mm； L_{fh} 为分禾盘中心距，mm。 R_h 为棉秆初始夹持位置与链轮中心点距离，mm。
Note: v_l is the speed of dividing plate, m·s⁻¹; v_m is forward speed of the machine, m·s⁻¹; v_w is the combined speed of the contact point between the dividing plate and the cotton stalk, m·s⁻¹; R_b and R_x are the radius of the notch arc on the dividing plate, mm; S_{fh} and D_{min} are the maximum and minimum values of the dividing plate opening size, respectively, mm; R_{fh} is the outer radius of the dividing plate, mm; L_{fh} is the center distance of the two divider plate, mm; R_h is the distance between the initial clamping position of the cotton stalk and the center point of the sprocket, mm.

图 5 棉秆喂入过程分析

Fig.5 Analysis of cotton stalk feeding process

由分禾喂入过程运动分析可知，分禾盘能够顺利喂入棉秆的条件是 $\beta > 0^\circ$ ，分禾盘拨秆速度 v_l 必须大于机具前进速度 v_m [30]。为了及时、有序将棉秆喂入夹持器内， v_w 应略大于夹块运动线速度，由于分禾盘与链轮角速度 ω 相同，护圈在从动轮夹块外侧，因此可以保证 v_w 大于夹块运动线速度。此外，为了将棉秆控制在左、右分禾盘组成的封闭空间内，根据接触点棉秆的直径 D_{CS} ，分禾盘尺寸应满足：

$$D_{min} \leq D_{CS} \leq S_{fh} \quad (4)$$

试验测得新疆棉秆直径平均约 10 mm，考虑到仍有少数粗棉秆，以棉秆直径最大值 $D_{CS} = 15$ mm 计算，设计分禾盘半径 $R_{fh} = 150$ mm， $D_{min} = 20$ mm， $S_{fh} = 63$ mm，分禾盘开口两侧圆弧半径 R_b 和 R_x 分别为 126 和 46 mm，周向均布 12 个。

2 组分禾盘呈上下排布，分禾盘中心距 L_{fh} 应满足：

$$2R_{fh} < L_{fh} < 2R_{fh} \quad (5)$$

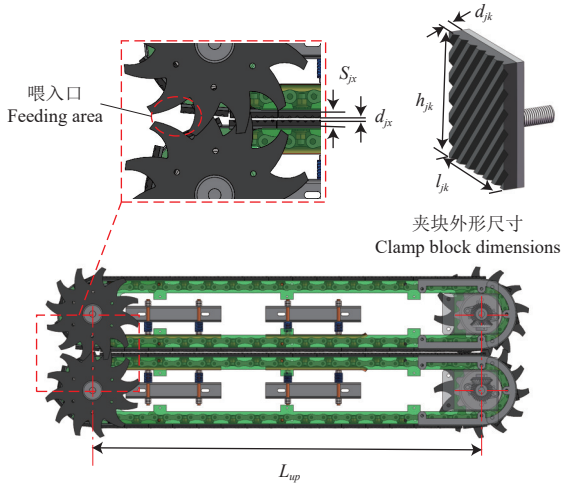
棉秆被夹持后，在两侧张紧导轨的强制侧限作用下，橡胶块产生椭圆状压陷变形，夹块之间间隙越小越好，可避免过细棉秆滑脱，因此理论柔性变形间隙 S_{jx} (图 6) 应满足：

$$S_{jx} = 2d_{jk} + d_{jx} \geq D_{CS} \quad (6)$$

为避免夹块之间运动干涉，设计夹块间初始间隙 $d_{jx} = 3$ mm。

根据式 (6) 可知橡胶块厚度应大于 6 mm, 棉秆直径平均约 10 mm, 为保证棉秆可被完全包裹, 设计橡胶块厚度为 10 mm, 左、右夹块和夹持间隙组成的柔性变形宽度 $S_{fx}=23$ mm, 具有足有柔性变形空间。不考虑棉秆压缩变形情况下, 直径不超过 23 mm 的棉秆均可原位夹持, 若棉秆直径大于 23 mm, 柔性变形宽度不足时, 张紧弹簧产生变形, 增大夹持间隙, 产生浮动夹持作用, 避免过度夹持。因此, 可实现对不同粗细棉秆的有效夹持。橡胶块长 l_{jk} 、宽 h_{jk} 与钢板尺寸相同, 均为 75 mm。

将 $R_{li}=118$ mm 代入式 (5) 可得 L_{fh} 为 236~300 mm, 该范围内分禾盘可形成封闭空间将棉秆喂入夹持器。



注: S_{fx} 为理论柔性变形间隙, mm; d_{fx} 为两夹块之间的初始间隙, mm; l_{jk} 、 h_{jk} 和 d_{jk} 分别为橡胶块长、宽和厚, mm; L_{up} 为夹持链中心距, mm。
Note: S_{fx} is the theoretical flexible deformation gap, mm; d_{fx} is the initial gap between the two clamps, mm; l_{jk} 、 h_{jk} and d_{jk} are the length, width and thickness of the rubber block, respectively, mm; L_{up} is the center distance of the clamping chain, mm.

图 6 棉秆夹持间隙结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of cotton stalk clamping clearance

2.1.2 棉秆夹持拔取过程分析

棉秆夹持拔取时植株姿态变化如图 7 所示, 假设棉秆在 P 点被夹持, 并且拔取过程中棉秆与夹持器无相对滑移, 认为棉秆根系全部脱离地表为成功拔除, 则棉秆成功拔取的提升高度应满足:

$$H_{up} \geq H_p + L_r \quad (7)$$

H_p 范围为 100~200 mm, L_r 范围为 150~230 mm。由式 (7) 得到 H_{up} 需大于 430 mm。

由图 7 三角形函数关系可知:

$$L_{up} = \frac{H_{up} - H_p}{\sin \alpha} \quad (8)$$

根据割台与地面夹角 α 的设计范围 ($20^\circ \sim 45^\circ$), 计算得到夹持链中心距长度 L_{up} 最小应大于 460 mm, 考虑到传动布置及张紧导轨底座长度等因素, 设计 $L_{up}=1\,225$ mm。

棉秆运动过程如图 8 所示, 由于分禾盘的喂入作用, 夹持拔取时, 棉秆已向后退斜约 $5^\circ \sim 15^\circ$, 根据几何关系可知:

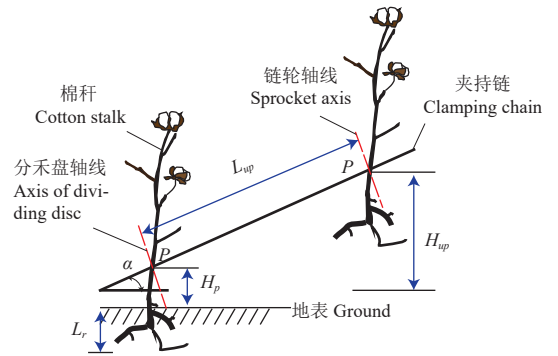
$$\frac{v_r}{\sin \delta} = \frac{v_m}{\sin(180^\circ - \alpha - \delta)} \quad (9)$$

$$\delta - \theta = 90^\circ \quad (10)$$

联立式 (9) 和 (10) 得:

$$v_r = \frac{\cos \theta}{\cos(\alpha + \theta)} v_m \quad (11)$$

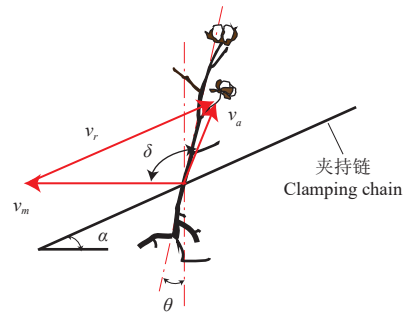
计算式 (11) 可得夹持输送速度 v_r 范围为 0.75~1.50 m/s, 分度圆半径为 159.2 mm, 得出链轮转速范围为 62.35~124.70 r/min, 圆整后设计链轮转速范围为 62~125 r/min。



注: H_{up} 为棉秆提升高度, mm; L_r 为棉秆根系长度, mm; H_p 为棉秆初始夹持点高度, mm; α 为割台与地面夹角, $^\circ$; P 为夹持点。
Note: H_{up} is lifting height of cotton stalk, mm; L_r is the root length of cotton stalk, mm; H_p is the height of the initial clamping point of cotton stalk, mm; α is the angle between the header and the ground, $^\circ$; P is the clamping point.

图 7 棉秆姿态变化过程

Fig.7 Cotton stalk posture change process



注: v_r 为夹持链速度, $m \cdot s^{-1}$; v_a 为棉秆拔取速度, $m \cdot s^{-1}$; θ 为棉秆后倾角, $^\circ$; δ 为棉秆拔取速度和机具前进速度的夹角, $^\circ$ 。
Note: v_r is the clamping chain speed, $m \cdot s^{-1}$; v_a is the cotton stalk uprooting speed, $m \cdot s^{-1}$; θ is the cotton stalk backward tilt angle, $^\circ$; δ is the angle between the cotton stalk uprooting speed and the forward speed of the machine, $^\circ$.

图 8 棉秆拔取速度分析

Fig.8 Analysis of cotton stalk uprooting speed

进一步对棉秆拔取过程中棉秆绝对运动速度与机具前进速度、夹持输送速度的关系进行分析, 由图 8 可得:

$$v_r \cos \alpha - v_m = -v_a \cos \delta \quad (12)$$

$$v_r \sin \alpha = v_a \sin \delta \quad (13)$$

当 $v_r \cos \alpha - v_m = 0$ 时, 即夹持输送速度的水平分速度与机具前进速度相等, 棉秆绝对运动速度的水平分速度为 0, 即 $\delta=90^\circ$, 此时棉秆绝对运动速度方向竖直向上, 速度大小为 $v_r \sin \alpha$, 棉秆为垂直拔取状态。但是在实际拔取过程中, 由于工作环境、分禾盘等机构碰撞、振动等

原因, 导致无法始终保持理论上的垂直拔取状态。此外, 根据棉秆拔取力试验研究结果, 棉秆垂直拔取时根系全部受拉, 此时拔取阻力大, 不利于拔取。

当 $v_r \cos \alpha - v_m > 0$ 时, 即夹持输送速度的水平分速度大于机具前进速度, $90^\circ < \delta < 180^\circ$, 这种情况下, 棉秆绝对运动速度水平分速度与机具前进速度方向相反, 可以有效防止棉秆堵塞; 棉秆绝对运动速度方向为机具前进方向的斜后方, 即棉秆斜向后拔取, 该状态较为理想。

当 $v_r \cos \alpha - v_m < 0$ 时, 即夹持输送速度的水平分速度小于机具前进速度, $0^\circ < \delta < 90^\circ$, 这种情况下, 棉秆绝对运动速度方向为机具前进方向的斜前方, 即棉秆斜向前拔取, 但棉秆绝对运动速度水平分速度与机具前进速度方向相同, 易造成棉秆在喂入端拥堵, 不利于棉秆的持续性拔取作业。

根据上述分析可知, 棉秆夹持输送速度还需要满足 $v_r \cos \alpha > v_m$, 即夹持输送速度的水平分速度大于机具前进速度, 得到两者关系为:

$$K_v = \frac{v_r}{v_m} > \frac{1}{\cos \alpha} \quad (14)$$

式中 K_v 为夹持输送速度与机具前进速度比值, 根据 v_m 和 α 计算得到 $1.06 < K_v < 1.4$, 在夹持输送速度、倾斜角度和机具前进速度设定时, 还需考虑三者间的互相关系, 对 K_v 进一步校核。

综上可知, 对棉秆夹持拔取机构正常工作有主要影响的因素有: 机具前进速度 v_m 、夹持器运动速度 v_r 、割台与地面夹角 α 。

2.2 张紧导轨机构

以棉秆完全夹持且受力平衡时刻为研究对象, 分析棉秆径向受力情况, 如图 9 所示, 棉秆整体的夹持应力 σ_{CS} 与橡胶块应力 σ_r 和张紧弹簧的张紧应力 σ_{cla} 三者间关系满足:

$$\sigma_{cla} = \sigma_r = \sigma_{CS} \quad (15)$$

$$\sigma_{cla} = \frac{F_{cla}}{l_{jk} \cdot S_r} \quad (16)$$

$$S_r = h_{jk} [\pi L_2 + 2(L_1 - L_2)] \quad (17)$$

式中 σ_{cla} 、 σ_r 和 σ_{CS} 分别为张紧弹簧、橡胶块和棉秆的应力, MPa; S_r 为橡胶块受力面积, m^2 ; L_1 为棉秆横截面椭圆半长轴长度, m。

同理, 单边限位导轨的弹簧夹持力 F_{cla} 、橡胶块受力 F_r 、棉秆夹持力 F_{CS} 三者间关系满足:

$$F_{cla} = F_r = F_{CS} \quad (18)$$

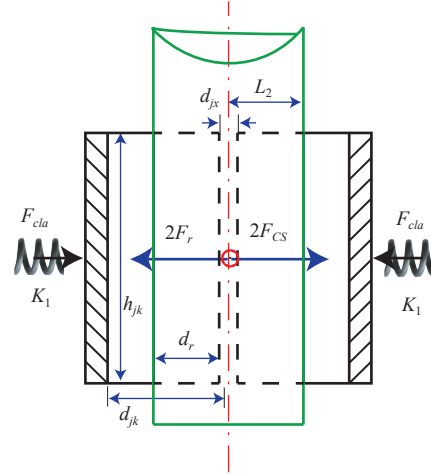
$$F_{cla} = K_1 \cdot \Delta x_{cla} \quad (19)$$

$$F_r = \sigma_r S_r \quad (20)$$

式中 Δx_{cla} 为弹簧形变量, m; σ_r 为橡胶块应力, MPa; σ_{CS} 为棉秆承受的应力, MPa。

前期试验测试得到新疆棉秆拔除阻力最高达 1100 N, 为了提高拔除成功率, 拉拔力设计值取 1200 N, 考虑夹持器与棉秆摩擦系数, 结合张紧机构双弹簧布局及安装

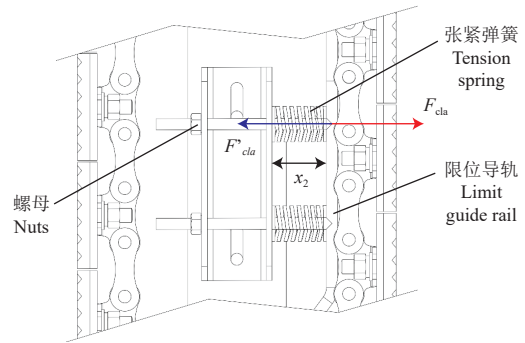
结构尺寸 (图 10), 设计单根弹簧的夹持力=1200 N, 弹簧安装长度 $x_2=42.6$ mm, 设计弹簧初始长度 $x_1=50$ mm, 即 $\Delta x_{cla}=7.4$ mm, 代入式 (15) 可得弹簧的刚度系数 $K_1=162$ N/mm, 综合考虑后选用高强度合金钢模具弹簧, 弹簧外径 35 mm, 内径 18 mm, 极限压力为 1617 N。该弹簧具有体积小、弹性好、强度大、韧性好, 不易变形和断裂、使用寿命高等优点。



注: F_{cla} 为夹持力, N; F_r 为橡胶块挤压力, N; F_{CS} 为棉秆承受的挤压力, N; K_1 为弹簧的弹性系数, $N \cdot m^{-1}$; L_2 为椭圆半短轴长度, m。
Note: F_{cla} is the clamping force, N; F_r is the clamping force of the rubber block, N; F_{CS} is the clamping force on the cotton stalk, N; K_1 is the elastic coefficient of the spring, $N \cdot m^{-1}$; L_2 is the length of the semi-minor axis of the ellipse, m.

图 9 棉秆径向夹持力分析

Fig.9 Analysis of the radial clamping force of cotton stalk



注: F'_{cla} 为夹持力的反作用力, N; x_2 为张紧弹簧安装长度, mm。
Note: F'_{cla} is the reaction force of the clamping force, N; x_2 is the installation length of the tension spring, mm.

图 10 张紧导轨机构受力分析

Fig.10 Force analysis of tensioning guide mechanism

2.3 变刚度夹持器与棉秆互相作用分析

夹持力大小与夹持面积、夹持棉秆数量及棉秆力学特性等因素有关。夹持后, 棉秆与夹持器的接触轮廓为棉秆外轮廓, 高度等于夹块高度 (75 mm), 夹持面积约 2355 mm^2 , 稳定性好。变刚度夹持器设计时, 外侧钢板为骨架支撑作用, 选取刚度大于棉秆的刚性材料, 内侧橡胶块刚度须小于棉秆刚度, 保证夹持时橡胶块变形优先与棉秆, 根据棉秆力学特性^[31], 选取橡胶块硬度为 60 HA。受棉秆种植模式和大拔取力需求影响, 棉秆夹持拔取作业时多为单株喂入、单株拔取, 窄行的双株棉秆由分禾盘错位喂入、单株拔取, 因此通常情况下均为

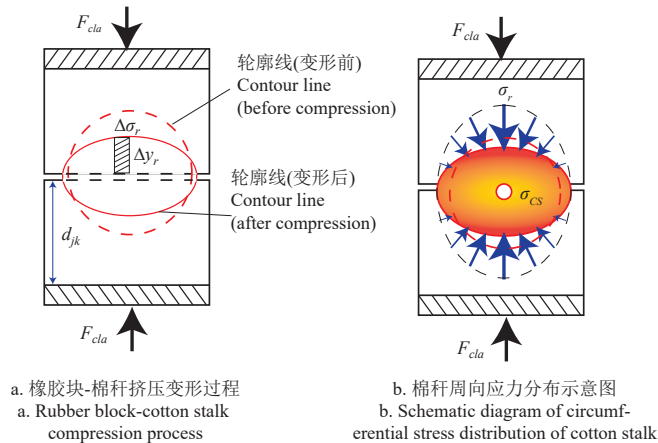
单株拔取。

以棉秆完全夹持且受力平衡时刻为研究对象，分析横截面上橡胶应力，取法向上橡胶块微元体为研究对象，如图 11a 所示，橡胶块上微小压痕产生的橡胶块微应力为

$$\Delta\sigma_r = E_r \left[(1 + \Delta\varepsilon_r) - (1 + \Delta\varepsilon_r)^{-2} \right] / 3 \quad (21)$$

$$\Delta\varepsilon_r = \Delta y_r / d_{jk} \quad (22)$$

式中 E_r 为橡胶块的表观弹性模量，MPa； $\Delta\varepsilon_r$ 为微元体橡胶块法线上应变。



注： $\Delta\sigma_r$ 为微元体橡胶块应力，MPa； Δy_r 为橡胶块压缩变形量，mm； σ_r 为橡胶块应力，MPa； σ_{CS} 为棉秆应力，MPa。
Note: $\Delta\sigma_r$ is the stress of the microelement rubber block, MPa; Δy_r is the compression deformation of the rubber block, mm; σ_r is the stress of the rubber block, MPa; σ_{CS} is the stress of the cotton stalk, MPa.

图 11 变刚度夹持器与棉秆互作力学分析

Fig.11 Mechanical analysis of variable stiffness gripper interaction with cotton stalks

由式 (21) 和式 (22) 可知，橡胶块应力与其应变、表观弹性模量成正相关关系，其应变大小与压缩深度成正相关关系，与橡胶厚度成负相关关系，橡胶块变形即压痕深度与棉秆直径、棉秆压缩变形量有关，棉秆直径越大、压痕越深；棉秆自身压缩变形量越小，压痕越深。根据橡胶块压痕深度变化规律可知，在橡胶块与棉秆接触界面上（横截面），从左到右随着棉秆直径变化，橡胶块压痕深度由浅至深在变浅，左右对称且在棉秆横截面法向中线上达到最大变形。根据牛顿第三定律可知，在各接触微元体上，棉秆承受的挤压力与橡胶块内应力大小相等、方向相反。因此，对棉秆的夹持力沿棉秆外径呈周向规律性非均匀分布，力的大小在棉秆横截面中轴线上呈对称分布趋势，如图 11b 所示。

由图 11 可见，橡胶块的柔顺性极大改善了刚性夹持时应力集中对棉秆的破坏作用，变刚度夹持器作用下棉秆周向受力，具有柔性夹持效果，可有效改善棉秆断裂现象，且可通过 F_{cla} 调整棉秆的夹持力及变形，实现棉秆的不断裂拔取。

3 田间试验

3.1 试验条件及方法

为验证变刚度夹持拔取棉秆装置的作业性能并确定

最优工作参数，2022 年 11 月在江苏省盐城市大丰区现代农业产业技术体系示范基地进行田间试验。试验棉花品种为中棉所 50，收获时测得试验地土壤坚实度为 4 028.6 kPa，平均棉秆直径（夹持区）为 15.55 mm，最大值为 21.46 mm，最小值为 11.53 mm；平均土壤含水率为 38.3%，棉秆平均含水率为 52.8%。

试验参考 GB/T 8097-2008《收获机械 联合收割机试验方法》、GB/T 5262-2008《农业机械设计条件 测定方法的一般规定》及 DB37/T 1856-2011《齿盘式拔棉秆机通用技术条件》，计算棉秆拔净率、拔断率和漏拔率。

3.2 评价指标

每次试验前，统计测试区内待拔棉秆总株数，试验后，统计测试区内棉秆漏拔、拔断和成功拔除的株数，试验重复 3 次，结果取平均值。以棉秆拔净率为主要考核指标，漏拔率和拔断率为辅助考核指标，计算式为

$$\begin{aligned} Y_l &= \frac{M_l}{M_z} \times 100\% \\ Y_d &= \frac{M_d}{M_z} \times 100\% \\ Y_j &= 100 - Y_l - Y_d \end{aligned} \quad (23)$$

式中 Y_l 、 Y_d 、 Y_j 分别为棉秆漏拔率、拔断率和拔净率，%； M_l 、 M_d 、 M_j 分别棉秆漏拔、拔断和拔除株数， M_z 为每组试验区域内棉秆总株数。

3.3 试验方案及结果

根据前文分析结果，选取影响拔取作业效果的 3 个主要影响因子—机具前进速度、链轮转速、预紧力开展试验研究。试验时，通过手扶拖拉机油档切换获取不同机具前进速度，通过更换变速箱输入端链轮齿数调整夹持链轮转速，通过松紧螺母调节弹簧的压缩量获得不同的预紧力。

根据关键结构设计和预试验结果，取机具前进速度范围 0.38 ~ 1.06 m/s，链轮转速范围 62 ~ 125 r/min，对应的夹持链线速度为 0.75 ~ 1.5 m/s，预紧力范围为 1 500 ~ 2 000 N。试验因素水平编码值见表 2，试验方案及结果见表 3。

表 2 试验因素及水平

Table 2 Experimental values and coded levels

水平 Level	机具前进速度 Forward speed of harvest $X_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	链轮转速 Rotation speed of srocket $X_2 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	预紧力 Clamping force X_3 / N
-1	0.38	62	1 500
0	0.68	84	1 750
1	1.06	125	2 000

3.4 结果与分析

3.4.1 回归模型及方差分析

利用 Design-Expert 软件开展多元回归拟合，并对拔净率、漏拔率进行方差分析，如表 4 所示，根据方差分析结果建立机具前进速度 x_1 、链轮转速 x_2 和预紧力 x_3 三个因素与拔净率 Y_j 、漏拔率 Y_l 之间的回归方程为

$$\begin{aligned} Y_j &= 96.27 + 0.63x_1 + 0.77x_2 + 0.8x_3 + 5.08x_1x_2 - \\ &1.03x_1x_3 - 1.51x_2x_3 - 3.38x_1^2 - 2.66x_2^2 - 2.36x_3^2 \end{aligned} \quad (24)$$

$$Y_l = 3.73 - 0.59x_1 - 0.49x_2 - 0.58x_3 - 4.06x_1x_2 + 1.63x_1x_3 + 0.98x_2x_3 + 2.84x_1^2 + 2.18x_2^2 + 2.31x_3^2 \quad (25)$$

表 3 Box-Behnken 试验方案和结果

Table 3 Scheme and result of Box-Behnken test

试验号 Test No.	x_1	x_2	x_3	拔净率 Removal rate $Y_j/\%$	漏拔率 Leakage rate $Y_l/\%$
1	-1	1	0	85.00	11.00
2	1	0	-1	91.60	5.40
3	0	0	0	97.90	1.10
4	1	-1	0	85.30	10.60
5	0	0	0	96.22	1.78
6	1	0	1	90.90	7.10
7	1	1	0	96.23	1.77
8	0	0	0	96.25	1.75
9	0	1	1	91.80	6.20
10	-1	0	-1	88.10	9.90
11	0	0	0	96.80	1.20
12	0	-1	-1	87.68	8.20
13	0	-1	1	92.52	5.48
14	0	1	-1	93.00	5.00
15	-1	0	1	91.53	5.10
16	-1	-1	0	94.40	3.60
17	0	0	0	95.20	2.80

注: $x_1 \sim x_3$ 为 $X_1 \sim X_3$ 的编码值。Note: $x_1 \sim x_3$ are the encoding values of $X_1 \sim X_3$.

表 4 方差分析结果

Table 4 Variance analysis

指标 Index	方差来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean Square	F	P
Y_j	模型	242.57	9	26.95	59.41	<0.000 1**
	x_1	3.13	1	3.13	6.89	0.034*
	x_2	4.70	1	4.70	10.35	0.015*
	x_3	5.07	1	5.07	11.18	0.012*
	x_1x_2	103.33	1	103.33	227.77	<0.000 1**
	x_1x_3	4.26	1	4.26	9.40	0.018*
	x_2x_3	9.12	1	9.12	20.10	0.003**
	x_1^2	48.09	1	48.09	106.00	<0.000 1**
	x_2^2	29.84	1	29.84	65.78	0.000 1**
	x_3^2	23.49	1	23.49	51.78	0.000 2**
	残差	3.18	7	0.45		
	失拟项	1.35	3	0.45	0.99	0.484#
	总和	245.74	16			
Y_l	模型	172.87	9	19.21	58.85	<0.000 1**
	x_1	2.80	1	2.80	8.57	0.022 *
	x_2	1.91	1	1.91	5.86	0.046*
	x_3	2.67	1	2.67	8.18	0.024*
	x_1x_2	65.85	1	65.85	201.78	<0.000 1**
	x_1x_3	10.56	1	10.56	32.37	0.000 74**
	x_2x_3	3.84	1	3.84	11.771	0.011*
	x_1^2	33.86	1	33.86	103.75	0.000 02**
	x_2^2	20.02	1	20.02	61.36	0.000 1**
	x_3^2	22.53	1	22.53	69.04	0.000 07**
	残差	2.28	7	0.33		
	失拟项	0.46	3	0.153	0.34	0.802 #
	总和	175.15	16			

注: **表示影响极显著 ($P < 0.01$), *表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), #表示影响不显著 ($P > 0.05$)。下同。

Note: **means extremely significant impact ($P < 0.01$), *means significant impact ($0.01 \leq P < 0.05$), #means no significant impact ($P > 0.05$). The same below.

根据表 4 方差分析结果, 拔净率 Y_j 和漏拔率 Y_l 的模型 $P < 0.01$ 且失拟项 $P > 0.05$, 表明回归模型拟合准确。 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对模型影响极显著。通过比较 F 值大小可知, 影响棉秆拔净率的因素从大到小依次为预紧力、链轮转速和机

具前进速度, 影响棉秆漏拔率的因素从大到小依次为机具前进速度、预紧力和链轮转速。影响因子与拔净率之间的关系如图 12 所示, 在给定范围内, 拔净率随着影响因子的增大呈现先增后减的趋势, 存在最高拔净率。

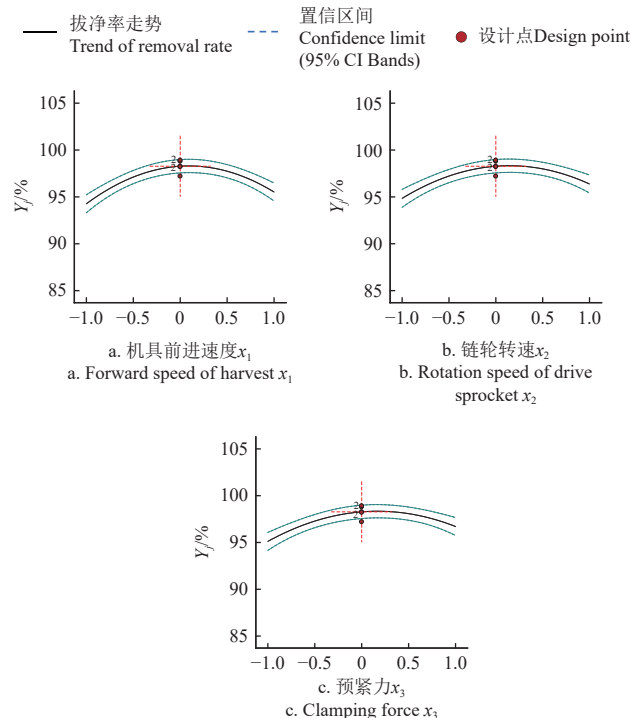


图 12 拔净率与变量之间的关系

Fig.12 Relationship between removal rate and variables

3.4.2 交互因子影响效果分析

根据表 4 方差分析结果可知, 在各因素的水平范围内, x_1 、 x_2 和 x_3 两两之间的交互作用对拔净率的影响均显著, 因此进行响应面分析, 利用 Design-Expert 绘制各因子交互作用对拔净率的响应曲面图, 如图 13 所示。

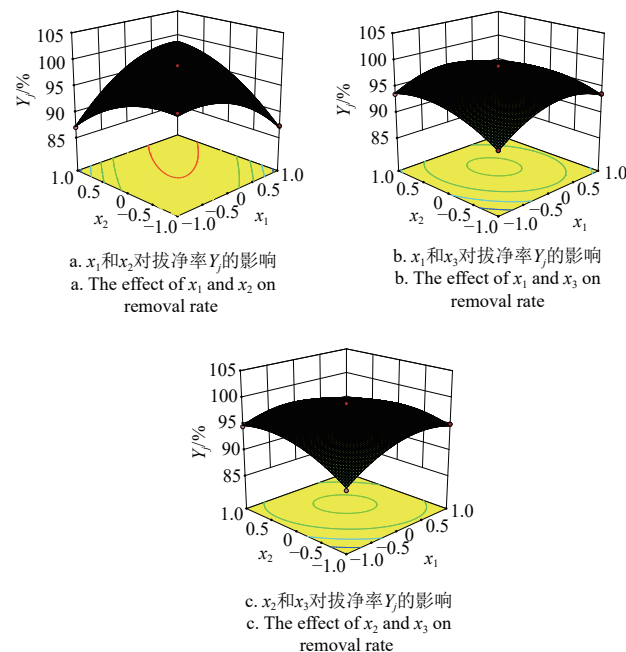


图 13 各因素交互作用对拔净率的影响

Fig.13 Effect of interaction of factors on pull-out rate

由图 13a 可知, 当预紧力处于中间水平, 机具前进

速度 0.38~1.06 m/s、链轮转速 62~125 r/min 时， x_1 与 x_2 存在明显交互作用；机具前进速度大、链轮转速小时拔净率低；机具前进速度小、链轮转速大时拔净率也低，说明棉秆拔取时水平分速度和垂直分速度的比例关系对拔取效果影响较大；随着机具前进速度增加，链轮转速增加有助于获得较高拔净率，当机具前进速度和链轮转速均处于中间水平附近存在最高值。这与前文棉秆拔取运动分析结果相吻合，即机具前进速度与夹持链水平线速度具备一定比例关系，当棉秆绝对运动趋势为斜向上（即水平分速度较小，而垂直分速度较大）时拔取效果好。

由图 13b 可知，当链轮转速处于中间水平时，拔净率随机具前进速度增大呈先增后减变化趋势，机具前进速度较大时拔净率相对更高；拔净率随预紧力增大呈先增后减变化趋势，这是因为预紧力偏小时对棉秆的夹持力偏小，拔取力不足导致漏拔数增大，而预紧力过大存在夹断棉秆的风险，导致拔断率增加。

由图 13c 可知，当机具前进速度一定时，拔净率随着链轮转速增加呈先增后减变化趋势，增幅明显而降幅较小，这是因为链轮转速偏低时，夹持器无法及时将前向棉秆有效夹持，导致棉秆拥堵，进而被机具推倒造成漏拔，链轮转速偏高时可将棉秆顺利夹持、拔取并向后输送，拔净率更高，低幅下降趋势可能是因为预紧力和夹持线速度均较高时，棉秆夹持变形速率和拔取速度偏高导致拔取失败，表明链轮转速和预紧力的交互作用对拔净率影响显著。

3.5 参数优化

为了得到最佳因素水平，结合试验因素边界条件，以棉秆拔净率最大、漏拔率最小为目标，对上述回归模型进行优化求解，建立参数优化数学模型，目标函数及约束条件见式（26）。

$$\begin{cases} \max Y_f(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_l(X_1, X_2, X_3) \\ s.t. \begin{cases} 0.38 \leq X_1 \leq 1.06 \\ 62 \leq X_2 \leq 125 \\ 1\,500 \leq X_3 \leq 2\,000 \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

求解后获得多组参数组合的解，结合前进速度与链轮转速的比例关系，选取其中一组最优解组合：前进速度 0.70 m/s、链轮转速 94.76 r/min、预紧力 1 792.08 N，此时棉秆拔净率理论值为 96.31%，棉秆漏拔率理论值为 3.69%。

3.6 验证试验

考虑到机具前进档位限制，无法精准调整机具前进速度至理论值 0.70 m/s，因此仍采用二挡前进速度即 0.68 m/s 进行试验，并对其他参数指标圆整优化：链轮转速 95 r/min、预紧力 1 792 N。基于变刚度夹持拔取棉秆试验台架，分别于 2022 年 11 月、2023 年 3 月在江苏省南京市盐城市大丰区棉花试验田（试验区 A）、新疆库尔勒市尉犁县极飞超级棉田（试验区 B）开展田间性

能验证试验（图 14）。试验区 B 为 760 mm 等行距种植模式，棉花品种为新陆中 66 号，株高 894~1 200 mm，棉秆含水率均值 24.6%，直径均值 10.2 mm（夹持区）。土壤类型为砂土地，含水率 34.6%，土壤硬度 4 452~5 530 kPa。棉花已收获，且滴灌带已回收。

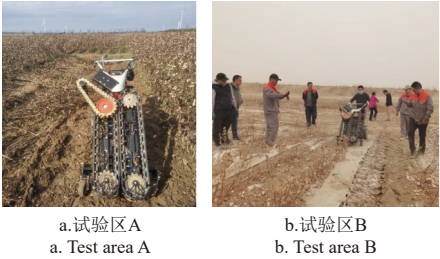


图 14 田间试验
Fig.14 Field experiment

验证试验结果如表 5 所示，在上述理论最优参数组合下，2 个试验区的综合棉秆拔净率实测均值为 94.70%，与理论预测值（96.31%）相对误差为 1.67%，小于 5%，棉秆的拔断率实测均值为 1.32%，棉秆的漏拔率实测均值为 3.99%，试验与预测结果基本一致，表明建立的棉秆拔净率预测模型可靠，可用于棉秆夹持拔取装置结构设计优化。对比拔断率和漏拔率可知，拔断率较低而漏拔率稍高，这表明变刚度夹持拔取装置可有效降低拔断率。装置是对行拔取，对行不准会导致漏拔率，结合试验现场情况发现，因对行不准造成的漏拔较少，漏拔的主要原因是少数细小棉秆夹持后滑脱。与现有夹持拔取装置（漏拔率 5.19%，拔断率 3.68%）^[18] 相比，变刚度夹持拔取装置的棉秆漏拔率和拔断率分别降低了 23.1% 和 64.13%。

表 5 验证试验结果
Table 5 Validation test results

参数 Parameter	试验区 Test areas	试验结果平均值 Mean value of test results /%	相对误差 Relative error /%	现有装置性能指标 Performance indicators of existing devices
拔净率 Remove ratio	A	95.28	1.07	/
	B	94.12	2.27	/
	A+B	94.70	1.67	91.13
漏拔率 Slip ratio	A	4.72	/	/
	B	3.25	/	/
	A+B	3.99	/	5.19
拔断率 Fracture ratio	A	0	/	/
	B	2.63	/	/
	A+B	1.32	/	3.68

4 讨 论

1) 在棉秆实际拔取收获中，只要不产生棉秆留茬影响后续残膜回收等机具作业，部分断裂或破损对于收获来说是可以接受的。因此，本研究中对于没有产生留茬的棉秆均视为成功拔除。

2) 棉秆的夹持力受夹持器结构参数、橡胶块硬度、厚度、棉秆自身力学特性以及夹持棉秆数量等因素影响。本研究重点分析了预紧力对拔取效果的影响，后续将开展变刚度夹持器与棉秆的交互作用力学研究，从夹持力

大小、应力分布、棉秆变形等角度研究变刚度夹持机理;其次,试验过程中,宽行棉秆为单株喂入、夹持、拔取,窄行棉秆为双株喂入,但在分禾盘作用下双株棉秆发生错位,然后被单株夹持和拔取,但不排除双株棉秆重叠夹持情况,后续将定量研究不同喂入量对夹持力的影响。

5 结 论

1) 针对棉秆整株拔取装置存在的夹断率高、拔净率低等问题,围绕夹持部件与棉秆的交互作用,利用柔性介质的良好柔顺性减少棉秆的夹持损伤,增加刚性介质提高夹持力,设计了变刚度夹持器,并结合链轮链条机构设计了变刚度夹拔式棉秆拔取装置。根据理论分析和计算,确定本文设计的变刚度夹持器对棉秆呈接近全包裹状态,夹持器对棉秆的夹持力呈周向非均匀分布状态;夹持链长度为 1 225 mm,张紧导轨机构的弹簧刚度系数为 162 N/mm,变刚度夹块中橡胶块厚度为 10 mm,长和宽均为 75 mm。

2) 根据变刚度夹拔式棉秆拔取装置拔秆作业过程及夹持器与棉秆交互作用力学分析,确定了影响棉秆夹持拔取的主要影响因素。运用响应曲面法分析了各因素对棉秆拔取作业质量的影响,得出影响棉秆拔净率的因素从大到小依次为预紧力、链轮转速和机具前进速度,影响棉秆漏拔率的因素从大到小依次为机具前进速度、预紧力和链轮转速。

3) 以最优参数进行田间验证试验,当机具前进速度为 0.68 m/s,链轮转速为 95 r/min、预紧力为 1 792 N 时,两个试验区综合验证试验结果为:拔净率为 94.70%、拔断率为 1.32%、漏拔率为 3.99%,拔净率实测值与模型预测值相对误差为 1.67%,小于 5%,试验与理论结果基本一致,研究结果可为棉秆变刚度夹持拔取装置研制提供参考。

【参 考 文 献】

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于 2022 年棉花产量的公告 [EB/OL]. [2022-12-26] https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901689.html
- [2] NGUYEN T T, BAILLERES H, REDMAN A, et al. Homogenous particleboard made from whole cotton (*Gossypium hirsutum* L.) stalk agricultural waste: Optimisation of particle size and influence of cotton residue on performance[J]. *BioResources*, 2020, 15(4): 7730-7748.
- [3] 王方正, 师勇强, 王文魁, 等. 棉花秸秆饲料化前景与技术分析[J]. *中国棉花*, 2022, 49(11): 37-41.
WANG Fangzheng, SHI Yongqiang, WANG Wenkui, et al. Analysis of the utilization prospect and technology of cotton straw in feed[J]. *China Cotton*, 2022, 49(11): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [4] KESHAV P K, BANOTH C, KETHAVATH S N, et al. Lignocellulosic ethanol production from cotton stalk: an overview on pretreatment, saccharification and fermentation methods for improved bioconversion process[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13(6): 4477-4493.
- [5] AGWA I S, OMAR O M, TAYEH B A, et al. Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117541.
- [6] 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(S2): 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(S2): 21-30. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘飞, 添长久, 路曦结, 等. 安徽省沿江地区棉秆还田种植模式对棉花苗期生长及病虫害发生的影响[J]. *中国棉花*, 2019, 46(11): 20-22.
LIU Fei, TIAN Changjiu, LU Xijie. Effect of cotton straw returning planting model on the growth and pest and disease occurrence at the cotton seedling stage along the Yangtze River in Anhui Province[J]. *China Cotton*, 2019, 46(11): 20-22. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张玉湘萌, 丁羽, 李景耀, 等. 我国棉秆还田机械现状与病虫害问题[J]. *农业机械*, 2023(3): 79-82.
- [9] JIANG P, LI Y P, LI J L, et al. Experimental research on the bending and fracture characteristics of cotton stalk[J]. *Transactions of the ASABE*, 2021, 64(6): 1771-1779.
- [10] RAMADAN Y. Y. R. Development and evaluation of a cotton stalks puller[J]. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2010, 1(10): 1061-1073.
- [11] KHUDAYAROV B, KUZIIYEV U, SARIMSAKOV B. Conditions for bending cotton stalks of a combined aggregation bender and their implementation[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 264: 4001.
- [12] GADIR E. Development of tractor operated cotton stalk puller[J]. *American journal of experimental agriculture*, 2013, 3(3): 495-505.
- [13] PAN Z G. Research on cotton stalk harvester based on double roller type[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 945-949: 286-289.
- [14] 沈从举, 郭慧静, 代亚猛, 等. 新疆棉秆回收机械化现状及发展对策[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(5): 53-63.
SHEN Congju, GUO Huijing, DAI Yameng, et al. Situation and strategies of mechanization in recycling of cotton stalk in Xinjiang[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(5): 53-63. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈明江, 赵维松, 王振伟, 等. 棉秆拔除相关技术研究现状[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(5): 29-35.
CHEN Mingjiang, ZHAO Weisong, WANG Zhenwei, et al. Research status of the cotton-stalk uprooting technology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(5): 29-35. (in Chinese with English abstract)
- [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 with English abstract)
- [17] 张佳喜, 郜周明, 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 Jiaxi, GAO Zhouming, CAI Jialin, et al. Design and experiments of cotton stalk pulling machine with horizontal-counter rollers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 43-52. (in Chinese with English abstract)
- [18] 谢建华, 吴仕花, 曹肆林, 等. 夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 101-111.
XIE Jianhua, WU Shihua, CAO Silin, et al. Design and test of clamping-roller cotton stalk pulling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 101-111. (in Chinese with English abstract)
- [19] 花俊国. 浮压双链夹持式拔棉秆机的研究[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(5): 549-552.
HUA Junguo. Study on floating double-chain tongs cotton-stalk puller[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 40(5): 549-552. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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.
ZHANG Jiaxi, 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. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Jiaxi, 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 with English abstract)
- [22] 陆玄鸣, 白敬, 王保升. 变刚度柔性夹持装置的研究进展[J]. 机电工程, 2023, 40(11): 1803-1813.
LU Xuanming, BAI Jing, WANG Baosheng. Review on compliant gripper with adjustable stiffness[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(11): 1803-1813. (in Chinese with English abstract)
- [23] 彭艳, 刘勇敢, 杨扬, 等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 11-20.
PENG Yan, LIU Yonggan, YANG Yang, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 11-20. (in Chinese with English abstract)
- [24] LEE J Y, SEO Y S, PARK C, et al. Shape-adaptive universal soft parallel gripper for delicate grasping using a stiffness-variable composite structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(12): 12441-12451.
- [25] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 43-50. (in Chinese with English abstract)
- [26] 邹亮亮, 刘雪美, 李金光, 等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 72-79.
ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 72-79. (in Chinese with English abstract)
- [27] 侯加林, 李超, 姜伟, 等. 大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 137-145.
HOU Jialin, LI Chao, LOU Wei, et al. Design and test of floating clamping device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 137-145. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王学林, 肖永飞, 毕淑慧, 等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 58-63.
WANG Xuelin, XIAO Yongfei, BI Shuhui, et al. Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 58-63. (in Chinese with English abstract)
- [29] ZHAO W S, XIE J H, WANG Z W, et al. Investigation of mechanical properties of cotton stalk based on multi-component analyses[J]. International Agrophysics, 2022, 36(4): 257-267.
- [30] 辛尚龙, 赵武云, 石林榕, 等. 立辊式玉米收获割台夹持输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 34-43.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiments of the clamping and conveying device for the vertical roller type corn harvesting header[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [31] ZHAO W S, CHEN M J, XIE J H, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107502.

Design and experiments of the clamping and uprooting device with adjustable stiffness for a cotton stalk

ZHAO Weisong^{1,2,3}, XIE Jianhua^{1✉}, CHEN Mingjiang^{2,3}, GAO Qimin², CAO Silin^{1,4},
WANG Zhenwei², CHEN Yongsheng^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. Western research institute, CAAS, Changji 831100, China; 4. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: Cotton stalk is one of the most high-quality biomass resources with a wide range of applications, such as building boards, chemical product raw materials, fuel, and papermaking. China is one of the major cotton-producing countries in the world. The planting area ($3 \times 10^6 \text{ hm}^2$) has been ranked third in 2022, leading to the very abundant cotton stalk resources. The cotton stalks can be fully utilized to accelerate the green and low-carbon development of agriculture. Mechanical harvesting can be expected to efficiently remove the cotton stalks from the field. However, the current uprooting machine also needs to be improved and optimized for the cotton stalk. In this research, a clamping-type uprooting device with variable stiffness was designed for a high uprooting rate and low clamping breakage rate. The variable rigidity clamping was adjusted as follows. The flexible rubber clamping was used to prevent the cotton stalk from breaking; A rigid support structure was designed on the outside of the rubber block to obtain a greater clamping force. The better performance was achieved by clamping tightly without breaking the cotton stalk. The uprooting was also improved for the two scenarios of breakage and slippage. The device often consisted of a dividing disk, variable stiffness clamping and pulling mechanism, and tensioning guide mechanism. The dividing disk was used for the orderly feeding of cotton stalks; The variable stiffness clamping and pulling mechanism was used to realize the clamping and pulling of cotton stalks; The tensioning guide mechanism was to effectively control the clamping force and gap of cotton stalks. Two sets of chains were utilized to drive multiple clamping blocks, indicating a simple and reliable structure. Moreover, the frictional heating of traditional flexible belt mechanisms was avoided in this structure. A mechanical analysis was carried out on the cotton stalk pulling motion and the interaction between the variable stiffness clamp and the cotton stalk. The critical structural dimensions and operating parameter ranges were determined for the variable stiffness clamping device. A systematic investigation was made to clarify the influencing factors on the quality of clamping and pulling. The response surface method (RSM) was used to analyze the effects of the forward speed, the rotational speed of the active sprocket, and the clamping force on the stalk uprooting performance of the variable stiffness clamping and pulling device. The field test validated the simulation. The results showed that there was very consistency between the experimental and theoretical predictions, when the forward speed was 0.68 m/s, and the sprocket speed was 95 r/min. The tension force was 1 792 N, and the cotton stalk uprooting rate was 94.70%. The relative error between the measured and predicted uprooting rate value was 1.67%, which was less than 5%. The leakage rate and breakage rate of variable stiffness clamping and uprooting devices were 3.99% and 1.32%, respectively, compared with the existing devices of 5.19% and 3.68%, respectively. Therefore, the leakage rate and breakage rate of the device were reduced by 23.1% and 64.13%, respectively, compared with the former. The variable stiffness gripper effectively reduced the cotton stalk breakage to realize the whole stalk uprooting. The finding can provide new ideas to design the variable stiffness clamps, in order to optimize and improve the cotton stalk pullers.

Keywords: agricultural machinery; stalk; cotton; variable stiffness clamping; uprooting; response surface