doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.008

前置式皮带夹持输送棉秆起拔机设计与试验

张佳喜　芮照钰　蔡佳麟　王毅超　叶尔波拉提·铁木尔　郜周明
(新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为解决棉秆起拔机拔断率高、起拔后铺放散乱的问题,基于带夹原理设计了一种前置式皮带夹持输送棉秆起拔机。该机关键部件为起拔输送机构,作业时通过皮带将棉秆夹持拔出,随后将其输送至机具一侧,有序铺放到地面上。首先分析棉秆起拔过程中产生漏拔及拔断的原因,其次进行拔秆机理理论分析,确定影响拔秆效果的主要因素及其取值范围。在棉花高度为 750 mm、根部直径为 10 mm、棉秆含水率为 25% ~35% 的试验地进行正交试验,进一步研究各影响因素对棉秆起拔效果的影响。试验结果表明,优化后的参数组合为机具前进速度 2.27 km/h、张紧量 71.26 mm、主动轮转速 244.98 r/min,此时棉秆拔断率为 3.53%,棉秆漏拔率为 5.09%。验证试验表明,在参数组合为机具前进速度 2 km/h、张紧量 70 mm、主动轮转速 250 r/min 条件下,棉秆拔断率为 3.67%,棉秆漏拔率为 5.32%,与优化值相对误差均小于 5%,证明样机设计合理,满足棉秆整株起拔的作业要求。

关键词: 棉秆起拔机; 皮带夹持输送; 前置式; 参数优化; 正交试验
中图分类号: S225.91+2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0077-08　　**OSID**:

Design and Test of Front Mounted Belt Clamping and Conveying Cotton-stalk Pulling Device

ZHANG Jiaxi　RUI Zhaoyu　CAI Jialin　WANG Yichao　YEERBOLATI·Tiemuer　GAO Zhouming
(*School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: In order to realize the recycling of cotton-stalk, it has been an urgent need to develop a cotton-stalk harvester applicable to the mechanical cotton picking and planting model in Xinjiang, so as to advance the whole-process mechanization of cotton harvesting. Aiming at solving the problems of high plucking rate and scattered spreading of cotton stalk in the process of pulling, a kind of front mounted belt clamping and conveying cotton-stalk pulling device was designed based on the principle of belt clamping and conveying. The cotton-stalk pulling device consisted of a front suspension device, dividers, a pulling and conveying device, and a hydraulic system. The pulling and conveying device was the key part of the device. It pulled out cotton stalks by belt clamping, then, the belt transported the stalks to one side of the machine. A quadratic regression orthogonal test with three factors and three levels was carried on, with cotton-stalk leakage rate and cotton-stalk plucking rate as response values, with forward speed, driving wheel speed, and tensional amount as the influence factors, and parameters were optimized. The results showed that the forward speed had significant effect on the cotton-stalk plucking rate, the driving wheel speed and the tensional amount had highly significant effects on the cotton-stalk plucking rate ($P<0.01$). While the forward speed, the driving wheel speed and the tensional amount had highly significant effects on the cotton-stalk leakage rate ($P<0.01$). The optimal parameter combination was forward speed of 2.27 km/h, tensional amount of 71.26 mm, and driving wheel speed of 244.98 r/min. According to the result of field verification test, under the working condition of the forward speed was 2 km/h, the tensional amount was 70 mm, and the driving wheel speed was 250 r/min, the cotton-stalk plucking rate was 3.67% and the cotton-stalk leakage rate was 5.32%. The test results showed that the theoretical results were coincident with the measuring results, and the error between them was less than 5%. The study results can provide references for the development and improvement of cotton whole-stalk pulling device.

Key words: cotton-stalk pulling device; belt clamping and conveying; front mounted; parameter optimization; orthogonal test

收稿日期: 2020-12-11　修回日期: 2021-01-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(51865058)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01A45)、2017 年新疆维吾尔自治区天山雪松计划项目(2017Q19)和新疆维吾尔自治区天山创新团队项目(2020D14037)
作者简介: 张佳喜(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事循环农业技术与装备研究,E-mail: 13899961137@163.com

0 引言

棉花是我国重要的经济作物之一,新疆棉区产量达全国总产量的 67.27%,且新疆棉区呈现持续扩张的趋势[1]。棉秆是棉花的主要副产品,木质化程度高,是一种优质可再生生物质资源[2-3]。我国棉秆年产量约 3 150 万 t,棉秆整株拔取能防止病虫害传播,消除对耕整地作业和作物播种的不良影响,针对新疆铺膜种植,整株拔取棉秆方便残膜回收,有利于土地的可持续发展[4]。研发适合新疆机采棉种植模式的棉秆收获机械,对提高棉秆资源利用率,促进棉花收获全程机械化发展有积极的意义。

国内外学者在棉秆收获技术和装备方面已取得一定成果。国外棉秆收获技术以对行收获为主,如美国的 AMADAS 棉秆拔取切碎收获机和澳大利亚的 Multi 拔棉秆机械,对种植行距标准要求高,不适用于新疆机采棉种植模式[5]。国内研制的棉秆收获机主要有链夹式、齿盘式、铲切式和对辊式,链夹式和齿盘式收获机的起拔部件为刚性材料,易夹断棉秆影响收获;铲切式收获机对种植行距适应性强,但功率消耗大,存在棉秆与残膜分离不完全的问题,影响棉秆及残膜的回收再利用;对辊式收获机起拔效果较好,但仅适用于种植行距较宽的等行距种植模式[6-10]。

笔者提出双柔性带裹夹拉拔的收获方式,设计的夹持带式棉秆收获机有效降低了棉秆拔断率,但采用后悬挂会导致拖拉机破坏棉秆生长状态,影响作业,因此针对新疆机采棉种植模式,基于带夹原理设计一种前置式皮带夹持输送棉秆起拔机,起拔机放置于拖拉机前可以防止拖拉机行驶对棉秆生长状态的破坏。对关键机构设计分析并进行正交试验与验证试验,以期为棉秆整株起拔技术研究提供参考。

1 机具结构与工作原理

1.1 机具结构

前置式皮带夹持输送棉秆起拔机的整机结构如图 1 所示,主要由前悬挂架、液压系统、起拔输送机构、分禾器等部件组成。

1.2 工作原理与技术参数

棉秆起拔机通过前悬挂与拖拉机前配重安装架相连接,固定于拖拉机正前方,拖拉机前进带动整机前进。液压工作站为液压缸和液压马达提供动力,通过操纵手柄控制液压缸升降以调节机具作业高度;液压马达带动主动轮旋转,传动皮带随主动轮转动,在摩擦力作用下带动夹持皮带 1 和夹持皮带 2 运动,主动轮转速可通过节流阀调节[11]。机组前进时,棉秆经分禾器进入皮带夹持区域,被皮带夹持拔出土壤并向侧边输送,最终有序铺放在机具一侧的地面上。

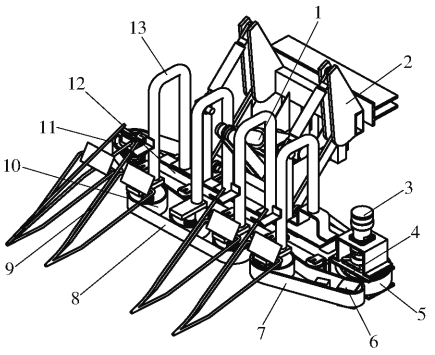


图 1 棉秆起拔机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of cotton-stalk pulling device

1. 液压缸 2. 前悬挂架 3. 液压马达 4. 主动轮 5. 传动皮带 6. 张紧轮 7. 夹持皮带 2 8. 夹持皮带 1 9. 分禾器 10. 外从动轮 11. 从动轮 12. 机架 13. U 形架

为实现棉秆铺放有序,避免已拔起棉秆影响连续作业,机具采用单侧输送。右侧夹持带长度由棉秆宽行行距决定,较长可以保证右侧棉秆完全拔出;在保证棉秆完成起拔基础上,为尽快将棉秆排出,避免大量棉秆积聚堵塞,左侧夹持带设计较短。前置式皮带夹持输送棉秆起拔机工作幅宽为 1 460 mm,整机尺寸(长×宽×高)为 1 410 mm×1 620 mm×1 180 mm,作业行数为 4 行。

2 关键部件设计

起拔输送机构是机具的主要工作部件,如图 2 所示,主要由机架、主动轮、从动轮、张紧装置、外从动轮、传动皮带、夹持皮带 1 和夹持皮带 2 组成。在机具前端均布 4 个外从动轮,通过 U 形架与机架连接,夹持皮带 1 安装在 3 个外从动轮上,夹持皮带 2 与外从动轮及张紧轮配合。针对新疆机采棉种植模式,即 100 mm+660 mm+100 mm[12],为保证作业时对行准确,设计相邻外从动轮中心距 a 为 250 mm(图 2b)。为防止皮带在棉秆拉拽下脱落,皮带轮设计为三槽带轮,并设置双螺杆结构的张紧装置,以提高作业稳定性。皮带宽度过小,安装不稳固易掉带,夹持棉秆长度过短导致起拔力不足,过大增加能耗和成本,参考现有设备[13],设计皮带宽度为 80 mm。

2.1 拔秆过程分析

棉秆起拔机为对行起拔,棉秆在分禾器作用下分别进入对应的夹持区域,从棉秆进入夹持区域接触皮带到脱离夹持完成收获为一个拔秆周期,主要分为 3 个阶段:夹持阶段、起拔阶段和输送阶段,如图 3 所示。

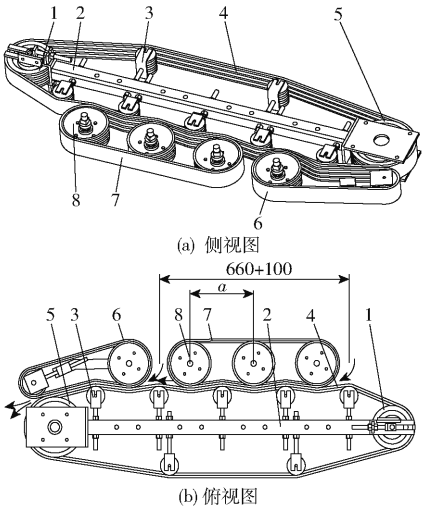


图 2　起拔输送机构结构示意图

Fig. 2　Structure diagrams of pulling and conveying device

1. 从动轮　2. 机架　3. 张紧装置　4. 传动皮带　5. 主动轮　6. 夹持皮带 2　7. 夹持皮带 1　8. 外从动轮

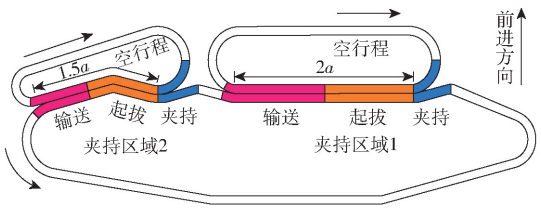


图 3　拔秆行程示意图

Fig. 3　Structure diagram of stalk pulling stroke

夹持阶段：棉秆在分禾器作用下进入夹持区域，接触皮带且逐渐被皮带夹紧。受机具前进作用，此阶段棉秆主要受推力 N 的作用，推力 N 方向与机具前进方向一致，如图 4 所示。

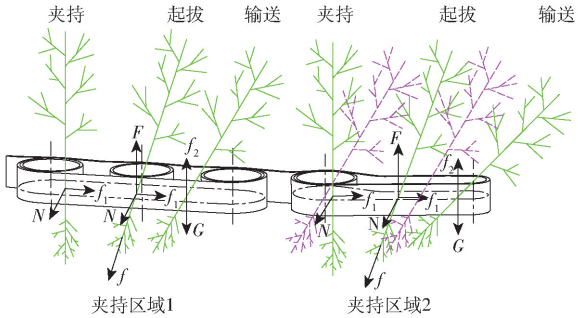


图 4　拔棉秆过程示意图

Fig. 4　Diagram of process of cotton-stalk pulling

起拔阶段：从棉秆被皮带夹持受起拔力到棉秆主根系完全拔出地面属于起拔阶段，此阶段棉秆在起拔力作用下克服土壤粘结力 f 和自身重力 G 做功，起拔力的实质为皮带对棉秆的摩擦力。在棉秆起拔过程中，起拔力 F 做正功，棉秆自身重力 G 和土壤粘结力 f 做负功，由于棉秆自身重力 G 相对土壤粘结力 f 可忽略不计，因此可以简化为起拔力克服土壤粘结力做功，如图 4 所示。起拔过程中，起拔力要大于土壤粘结力，即 F 大于 f，并且要保证一定的作用时间才能完成起拔。

输送阶段：棉秆脱离土壤约束后，推力 N 消失，棉秆仅受摩擦力 f_2 和重力 G 作用，如图 4 所示。棉秆在皮带夹持下侧向输送，直至被夹持皮带 2 运输到机具最左侧（图 2b），最终脱离夹持，在惯性作用下铺放至地表。

棉秆起拔过程中拔秆失败会出现漏拔和拔断两种情况，下面分别对这两种情况进行分析。

2.1.1　漏拔分析

导致漏拔的原因主要有：因皮带摩擦力不足，棉秆无法被夹持；起拔时皮带夹持力不足，起拔力小于根系与土壤粘结力导致棉秆滑落。

首先对棉秆被夹持所需条件进行分析。棉秆在机具前进和分禾器作用下进入夹持区域，在皮带摩擦力作用下到达初始夹持点。棉秆在初始夹持点受力情况如图 5 所示，传动皮带对棉秆的支持力和摩擦力分别为 N_3、f_3，夹持皮带 1 对棉秆的支持力和摩擦力分别为 N_4、f_4。有

$$\begin{cases} f_3 = \mu N_3 \\ f_4 = \mu N_4 \end{cases} \tag{1}$$

式中　μ——皮带与棉秆摩擦因数

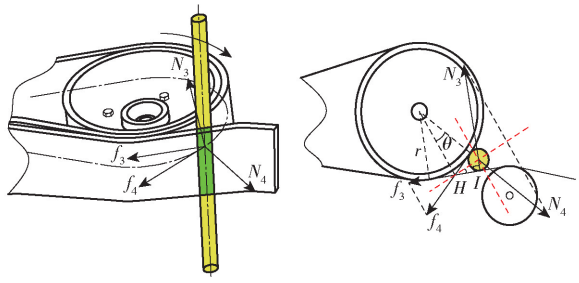


图 5　棉秆夹持受力示意图

Fig. 5　Force diagram of cotton-stalk clamping

将夹持力和摩擦力沿进入夹持方向和垂直进入夹持方向分解，棉秆被皮带夹紧所需条件为

$$N_3\sin\theta + N_4\sin\theta < f_3\cos\theta + f_4\cos\theta \tag{2}$$

式中　θ——皮带进入夹持角，(°)

联立式(1)、(2)可得

$$\mu > \tan\theta \tag{3}$$

HI 长度为 c，根据三角形相似，由图 5 可知

$$\tan\theta = \frac{c}{r} \tag{4}$$

$$\tan\theta = \frac{r_1}{c} \tag{5}$$

联立可得

$$\tan^2\theta = \frac{r_1}{r} \tag{6}$$

代入式(3)可得外从动轮半径

$$r > \frac{r_1}{\mu^2} \tag{7}$$

式中 r_1——棉秆半径,mm

r——外从动轮半径,mm

由图 2b 可知,为保证对行准确,需满足关系式

$$2(a+r)<760\ \text{mm} \tag{8}$$

由式(7)可知,外从动轮半径 r 需满足一定条件,为防止皮带脱离带轮,保证皮带张紧,皮带轮半径不能过小;将 $a=250$ mm 代入式(8)可知,外从动轮半径 r 应小于 130 mm,皮带轮半径过大会增加能耗,设计外从动轮半径 r 为 90 mm。

在起拔输送过程中棉秆夹持越紧,越不容易产生倾斜、脱落,有利于起拔输送,但皮带张紧度过大,容易导致棉秆难以进入夹持和排出,还会使皮带磨损加剧,降低皮带寿命。为保证顺利拔取棉秆,在起拔和输送过程中需要保持稳定的夹持力。如图 2a 所示,设置多个外从动轮和张紧轮,呈 S 形分布,使皮带张紧均匀,保证皮带夹持力的稳定。如图 6a 所示,张紧轮通过双螺杆结构安装,皮带张紧度可以通过改变张紧轮与机架的距离 d 来调整,距离 d 越大,皮带张紧程度越大。

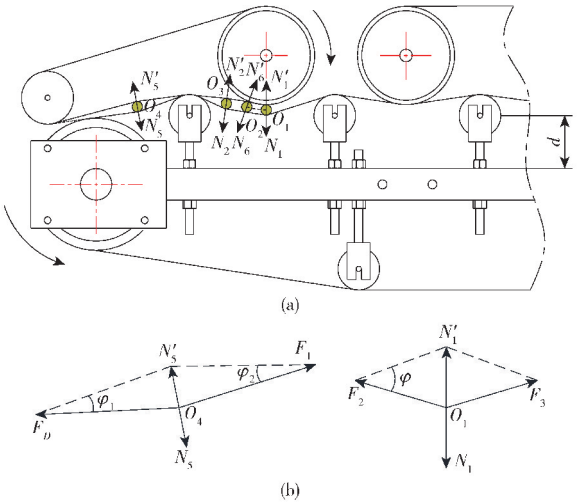


图 6 棉秆起拔输送过程受力分析

Fig. 6 Force analysis of cotton-stalk pulling and conveying process

棉秆被皮带夹持随皮带运动,点 O_1、O_4 处棉秆受力如图 6b 所示,根据受力平衡可知

$$N_1=N_1'=2F_D\sin\frac{\varphi}{2} \tag{9}$$

$$N_5=N_5'=F_D\left(\sin\frac{\varphi_1}{2}+\sin\frac{\varphi_2}{2}\right) \tag{10}$$

式中 N_1——点 O_1 外从动轮对棉秆夹持力,N

N_5'——点 O_4 传动皮带对棉秆夹持力,N

F_D——传动皮带张力,N

φ——皮带夹持角,(°)

φ_1——皮带下夹持角,(°)

φ_2——皮带上夹持角,(°)

N_5——点 O_4 外从动轮对棉秆夹持力,N

N_5'——点 O_4 传动皮带对棉秆夹持力,N

由式(9)、(10)可知,夹持力与皮带张力 F_D 成正比,皮带张力 F_D 又随皮带张紧度增大而增加,因此可以通过改变皮带张紧度来控制皮带夹持力。

点 O_1 至点 O_2 棉秆被皮带夹持区间属于起拔阶段,在此区间棉秆被皮带夹持绕外从动轮做匀速圆周运动,如图 6a 所示。根据向心力计算公式有

$$N_1'-N_1=\frac{mv^2}{r} \tag{11}$$

皮带对棉秆的最大静摩擦力为

$$f_{\max}=\mu(N_1'+N_1) \tag{12}$$

将式(11)代入式(12)可得

$$f_{\max}=\mu\left(2N_1+\frac{mv^2}{r}\right) \tag{13}$$

式中 m——棉秆质量,g

v——皮带线速度,m/s

皮带对棉秆最大静摩擦力若小于根系与土壤的粘结力会造成棉秆滑落,无法完成起拔。由式(13)可知,皮带线速度在一定程度上影响了最大静摩擦力。皮带线速度增加可以提高最大静摩擦力,但线速度过大,动载荷过大,容易导致棉秆拔断。皮带线速度过小,最大静摩擦力不足,棉秆易滑落而造成漏拔。

2.1.2 拔断分析

棉秆断裂一般发生在起拔阶段,当棉秆强度小于棉秆根系与土壤的粘结力时导致拔断,否则棉秆会被拔起。棉秆试样制备如图 7 所示,并在万能试验台进行棉秆拉伸试验,测定棉秆不同部位的拉伸破坏载荷,试验结果如表 1 所示。

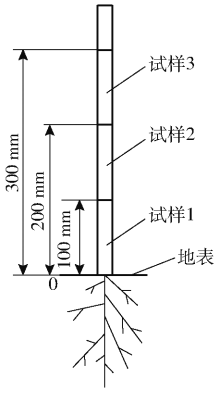


图 7 棉秆拉伸试验试样制备

Fig. 7 Tensile test of cotton-stalk

棉秆根系与土壤的粘结力最大约为 850 N[14],由表 1 可知,越接近棉秆底部棉秆的强度越大[15-17],机具夹持起拔高度低于 300 mm,棉秆底部 300 mm 的拉伸破坏载荷最小为 1 304 N,远大于棉秆与土壤粘结力最大值,因此不会将棉秆拔断。

表 1　棉秆不同部位拉伸破坏载荷

Tab. 1　Failure tensile load of different parts of cotton-stalk　　N

序号	试样 1	试样 2	试样 3
1	2 527	2 037	1 412
2	2 408	2 283	1 457
3	2 724	2 051	1 514
4	2 439	1 995	1 304
5	2 654	2 078	1 350
均值	2 550	2 089	1 407

棉秆拔断的主要原因是被夹持部位变形量过大，木质部纤维断裂后，抗拉强度降低。为降低拔断率，起拔输送机构采用柔性皮带夹持，可以有效减小棉秆变形。

棉秆主干横截面接近圆形，两侧受皮带夹持力后呈近似椭圆形，对棉秆和皮带变形进行分析，如图 8 所示。棉秆被皮带包裹并夹持，产生变形有恢复原状的趋势，从而将棉秆部分变形转移为皮带变形，棉秆发生形变 D_1 并产生变形抗力 F_1，皮带发生形变 D_2 并产生对棉秆的夹持力 F_2，棉秆与皮带接触面的荷载为 Q，棉秆形变 D_1、皮带形变 D_2 均与接触面荷载 Q 正相关，F_1、F_2 大小相等方向相反，即

$$F_1 = F_2 \tag{14}$$

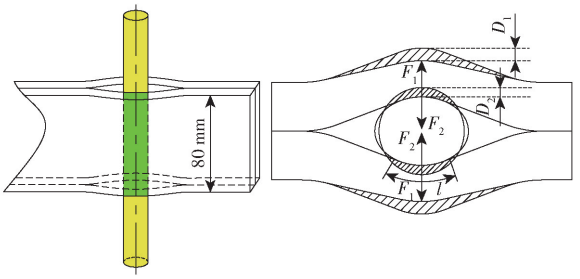


图 8　皮带棉秆变形示意图

Fig. 8　Diagram of belt and cotton-stalk deformation

皮带包裹棉秆横截面圆周的弧长为 l，棉秆被夹持长度 b 为 80 mm，皮带与棉秆接触面积为

$$S = \frac{bl}{10^6} \tag{15}$$

皮带对棉秆夹持力

$$F_2 = QS \tag{16}$$

皮带夹持相较于刚性部件夹持，与棉秆横截面圆周的接触弧长 l 较大，棉秆被夹持长度 b 也较大，所以皮带与棉秆的接触面积远大于刚性部件与棉秆的接触面积。由公式(14)、(16)可知，在夹持力相同的情况下，刚性部件与棉秆接触面的荷载 Q 远大于皮带，皮带夹持棉秆不易发生断裂，从而降低了棉秆拔断率。

2.2　拔秆机理分析

棉秆最终起拔结果有 3 种：漏拔、拔断和拔出。在拔秆过程中，机具以一定速度前进，同时皮带夹持棉秆转动，两者构成拔秆运动。以夹持皮带 1 和传动皮带夹持棉秆起拔为例，对工作过程进行运动分析。

如图 9 所示，点 M 为棉秆初始夹持点，夹持起拔过程中棉秆先随外从动轮转过角 α 到达点 M_1，然后随皮带向机具左侧水平移动距离 $2a$ 到达点 M_2，最终随外从动轮转过角 α 到达点 M' 脱离夹持。拔秆过程中棉秆被夹持点实际运动轨迹为 $PP_1P_3P_4$，其中 PP_1P_2 段轨迹为摆线，P_1P_3 段轨迹为直线，P_3P_4 段轨迹与 P_1P_2 段轨迹相同。

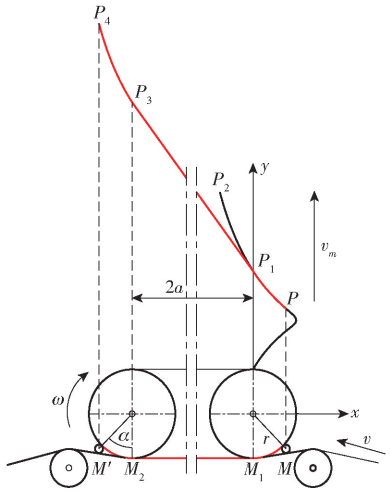


图 9　拔棉秆运动分析简图

Fig. 9　Motion analysis sketch of cotton-stalk pulling

以右侧外从动轮中心为原点建立直角坐标系，x 轴为水平方向，y 轴为机具前进方向，则夹持皮带 1 上各点的速度方程表达式为：

PP_1 段

$$\begin{cases} v_x = r\omega\cos(\omega t) \\ v_y = v_m - r\omega\sin(\omega t) \\ 0 < t \leqslant \dfrac{\alpha r}{v} \end{cases} \tag{17}$$

P_1P_3 段

$$\begin{cases} v_x = -v \\ v_y = v_m \\ \dfrac{\alpha r}{v} \leqslant t < \dfrac{2a + \alpha r}{v} \end{cases} \tag{18}$$

P_3P_4 段

$$\begin{cases} v_x = r\omega\cos\left(\omega\left(t - \dfrac{2a}{v}\right)\right) \\ v_y = v_m - r\omega\sin\left(\omega\left(t - \dfrac{2a}{v}\right)\right) \\ \dfrac{2a + \alpha r}{v} < t \leqslant \dfrac{2a + 2\alpha r}{v} \end{cases} \tag{19}$$

其中

$$v = \frac{\omega r}{10^3} \tag{20}$$

式中　v_m——机具前进速度，km/h

ω——外从动轮角速度，rad/s

v_x——皮带上各点绝对速度沿 x 轴方向分量，m/s

v_y——皮带上各点绝对速度沿 y 轴方向分量,m/s

t——点 M 开始棉秆被夹持时间,s

由式(17)~(20)可知,当主动轮转速增大时,皮带线速度 v 增大,则外从动轮角速度 ω 变大,夹持皮带 1 上一点绝对速度在 x 轴方向上的分速度 v_x 随之增大。v_x 增大则棉秆被侧向输送的速度变快,棉秆起拔时间缩短。若主动轮转速过大,起拔时间过短,皮带动载荷过大易拔断棉秆;主动轮转速过小,起拔时间过长,侧向输送速度慢,工作效率低,棉秆累积易造成堵塞。

主动轮转速影响棉秆被侧向输送的速度,机具前进速度影响棉秆进入夹持的速度。棉秆起拔作业时,机具前进速度越快,因株距一定,所以棉秆进入夹持的速度就越快。若机具前进速度大于棉秆侧向输送速度,会由于棉秆输送不及时使棉秆不断集聚,最终导致堵塞皮带,无法继续作业;若机具前进速度小于棉秆侧向输送速度,棉秆侧向输送及时,不会导致堵塞,满足工作要求。

皮带线速度计算公式为

$$v=\frac{2\pi R\times 60n}{10^6} \tag{21}$$

式中 n——主动轮转速,r/min

R——主动轮半径,mm

主动轮转速的取值范围为 200~300 r/min,代入式(21)得皮带线速度的范围为 2.09~3.14 m/s,前进速度范围为 1~3 km/h,即 0.28~0.83 m/s,皮带最低线速度远大于最高前进速度,满足工作要求。

作业时,固定机具后端 2 个张紧轮不动,通过双螺杆结构改变前端 5 个张紧轮与机架的距离来控制皮带的张紧程度,以满足不同的作业需求。张紧轮与机架的距离 d 称之为张紧量,综合考虑皮带结构、带轮中心距、带轮直径等因素,本样机的张紧量确定为 60~100 mm,如图 10 所示,张紧量越大,皮带的张紧度就越大。

3 机具田间试验

3.1 试验材料与设备

试验于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州尉犁县达西村三队棉花地进行,土壤属于沙质土壤,选用常发 CFD554 型拖拉机(发动机标定功率 40.5 kW)。试验地采用一膜四行的种植模式,棉花品种为新陆早 45 号,窄行种植行距为 100 mm,宽行种植行距为 660 mm,株距 50 mm,株高约 750 mm。土壤含水率 9%~21%,土壤坚实度 3.5~5.5 kg/cm^2,

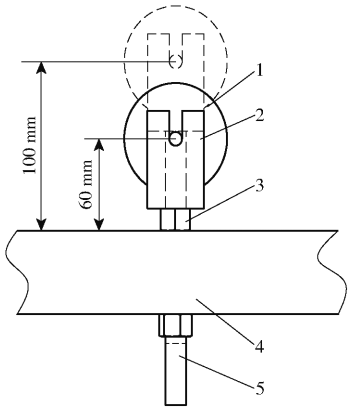


图 10 张紧轮调节示意图

Fig. 10 Schematic of tensioning wheel adjustment

1. 张紧轮 2. 安装架 3. 螺母 4. 机架 5. 螺柱

棉秆含水率 25%~35%,棉秆根部直径约 10 mm。

田间试验主要仪器设备有前置式皮带夹持输送棉秆起拔机、土壤紧实度测量仪、土壤水分测量仪、转速测量仪、电子天平、皮尺、卷尺、活动扳手等。棉秆起拔机田间试验现场如图 11 所示。



图 11 机具田间试验现场

Fig. 11 Field test site of device

3.2 试验指标与方法

试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机试验方法》进行。选定一块地势平坦、棉花长势良好的棉花地,在进行试验时,调节好试验中各参数的不同水平,拔秆过程中机具保持匀速前进。调整好参数后,机具每前进 20 m 作为一组试验,前后 5 m 为过渡段,作业前,记录将要作业的 20 m 区域内中间 10 m 的棉秆个数,记为 W。每组试验作业完毕后,记录中间 10 m 的棉秆中拔断的棉秆数 W_1 和漏拔的棉秆数 W_2。

为测试棉秆起拔机的拔秆效果,选择棉秆拔断率和棉秆漏拔率作为评价指标。根据拔秆机理分析结果,选取机具前进速度、主动轮转速和张紧量作为影响因素。试验因素编码如表 2 所示。

3.3 试验结果与分析

根据 Box-Benhnken 响应面分析方法,以前进速度、张紧量和主动轮转速为影响因素,以棉秆拔断率和棉秆漏拔率为试验指标,进行三因素三水平正交试验,试验方案与结果如表 3 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Factors and codes of test

编码	因素		
	前进速度 A/(km·h^{-1})	张紧量 B/mm	主动轮转速 C/(r·min^{-1})
-1	1	60	200
0	2	80	250
1	3	100	300

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Program and results of experiment

试验序号	因素			棉秆拔断率 Y_1/%	棉秆漏拔率 Y_2/%
	A/(km·h^{-1})	B/mm	C/(r·min^{-1})		
1	1	80	200	4.96	20.09
2	2	80	250	3.11	6.49
3	2	80	250	3.31	7.16
4	2	100	200	4.07	21.75
5	3	80	200	5.06	13.46
6	2	60	300	9.16	3.95
7	2	80	250	3.58	8.67
8	1	60	250	5.27	7.67
9	3	100	250	2.04	15.41
10	2	100	300	7.28	17.97
11	1	80	300	10.11	11.49
12	3	60	250	5.28	7.56
13	2	60	200	4.77	7.64
14	2	80	250	3.86	6.47
15	1	100	250	2.91	23.92
16	3	80	300	6.17	8.61
17	2	80	250	2.78	8.07

3.4　回归模型建立与显著性检验

对试验数据进行多元回归拟合，建立棉秆拔断率和漏拔率的二次回归模型，并进行方差分析，如表 4 所示。

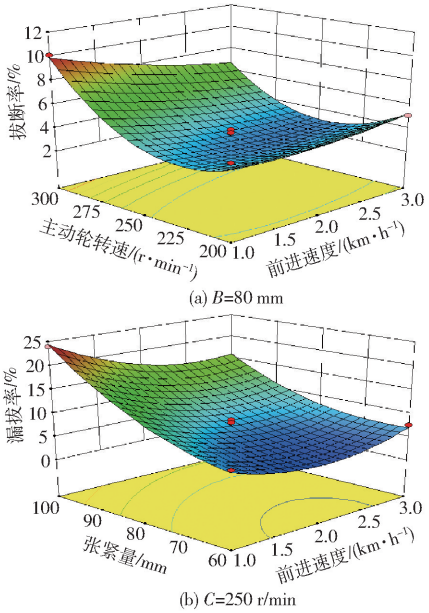
表 4　回归方程方差分析

Tab. 4　Variance analysis of regression equations

方差来源	棉秆拔断率 Y_1				棉秆漏拔率 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	76.24	9	18.48	0.000 4	588.77	9	41.44	0.000 1
A	2.76	1	6.02	0.043 8	41.09	1	26.03	0.001 4
B	8.36	1	18.25	0.003 7	341.00	1	216.00	0.000 1
C	24.01	1	52.39	0.000 2	54.71	1	34.65	0.000 6
AB	0.19	1	0.42	0.536 5	17.64	1	11.17	0.012 4
AC	4.08	1	8.90	0.020 4	3.52	1	2.23	0.179 3
BC	0.35	1	0.76	0.412 4	0.002	1	0.001	0.972 4
A^2	0.75	1	1.63	0.242 7	51.39	1	32.55	0.000 7
B^2	0.12	1	0.25	0.630 3	35.62	1	22.56	0.002 1
C^2	34.59	1	75.46	0.000 1	30.26	1	19.17	0.003 2
残差	3.21	7			11.05	7		
失拟	2.47	3	4.50	0.090 3	6.60	3	1.98	0.259 7
误差	0.73	4			4.45	4		
总和	79.45	16			599.82	16		

由表 4 可知，棉秆拔断率和漏拔率模型的 P 值均小于 0.01，回归模型均高度显著，失拟项 P 值均大于 0.05，两模型拟合程度高；决定系数 R^2 均大于 0.95，模型均可解释 95% 以上的评价指标，表明两模型可用于机具的参数优化。通过对比两模型中 A、B 和 C 的 P 值可知，各试验因素对棉秆拔断率的影响显著顺序由大到小为：主动轮转速、张紧量、前进速度；各试验因素对棉秆漏拔率的影响显著顺序由大到小为：张紧量、主动轮转速、前进速度。

图 12a 是张紧量位于中心水平（80 mm）时，前进速度和主动轮转速的交互作用对棉秆拔断率影响的响应面图，棉秆拔断率随着主动轮转速升高而先下降后上升，变动较大，但在前进速度升高时拔断率缓慢上升，变动较小，主动轮转速对棉秆拔断率的影响更为显著。图 12b 是主动轮转速位于中心水平（250 r/min）时，张紧量和前进速度的交互作用对棉秆漏拔率影响的响应面图。棉秆漏拔率随着前进速度升高而缓慢下降，但在张紧量增大时棉秆漏拔率上升较为迅速，张紧量对棉秆漏拔率的影响更为显著。



(a) B=80 mm

(b) C=250 r/min

图 12　交互因素对试验性能影响的响应面

Fig. 12　Response surfaces of influence of interactive factors on test performance

3.5　参数优化与试验验证

利用 Design-Expert 软件对建立的二次回归正交试验进行优化分析，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 1\ \text{km/h} \leqslant A \leqslant 3\ \text{km/h} \\ 60\ \text{mm} \leqslant B \leqslant 100\ \text{mm} \\ 200\ \text{r/min} \leqslant C \leqslant 300\ \text{r/min} \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

软件优化得出最优参数组合为：前进速度 2.27 km/h、

张紧量 71.26 mm、主动轮转速 244.98 r/min,此时棉秆拔断率和棉秆漏拔率分别为 3.53%、5.09%。

为了验证优化结果的准确性,采用与上述参数接近的数值,于巴音郭楞蒙古自治州尉犁县达西村三队棉花地进行了 3 次重复验证试验,结果取均值。考虑田间试验的可行性,将工作参数圆整为前进速度 2 km/h,张紧量 70 mm,主动轮转速 250 r/min。此时棉秆拔断率为 3.67%,棉秆漏拔率为 5.32%,试验值与优化值相对误差为 3.97% 和 4.52%,均小于 5%,满足棉秆起拔作业要求。验证试验效果如图 13 所示。



(a) 作业前 (b) 作业后

图 13 验证试验效果

Fig. 13 Verification test effect diagrams

4 结论

(1)为解决棉秆起拔时拔断率高、棉秆铺放散乱的问题,基于带夹原理设计了一种前置式皮带夹持输送棉秆起拔机。

(2)分析棉秆起拔过程中产生漏拔及拔断的原因,进行了拔秆机理理论分析,通过正交试验分析关键参数对作业效果的影响,得出各因素对棉秆拔断率影响大小顺序为:主动轮转速、张紧量、前进速度;对棉秆漏拔率影响大小顺序为:张紧量、主动轮转速、前进速度。

(3)通过 Design-Expert 软件优化得出的最优参数组合为:前进速度 2.27 km/h,张紧量 71.26 mm,主动轮转速 244.98 r/min,此时棉秆拔断率和棉秆漏拔率分别为 3.53%、5.09%。验证试验表明:在前进速度为 2 km/h,张紧量为 70 mm,主动轮转速为 250 r/min 时,棉秆拔断率为 3.67%,棉秆漏拔率为 5.32%,试验值与优化值相对误差均小于 5%,表明样机设计合理。

参 考 文 献

[1] 汪斑珏,杨程,张佳喜. 基于专利分析的我国棉秆收获技术的态势研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(9):19-25.
WANG Tingjue, YANG Cheng, ZHANG Jiaxi. Research status of cotton stalk harvesting technique based on patent analysis [J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2017, 38(9): 19-25. (in Chinese)

[2] 钟华平,岳燕珍,樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学,2003(4):62-67.
ZHONG Huaping, YUE Yanzhen, FAN Jiangwen. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. Resource Science, 2003(4): 62-67. (in Chinese)

[3] AKDENIZ R C, ACAROGLU M, HEPBASLI A. Cotton stalk as a potential energy source[J]. Energy Source,2004,26(1):65-75.

[4] 李彦斌,刘建国,程相儒,等. 秸秆还田对棉花生长的化感效应[J]. 生态学报,2009,29(9):4942-4948.
LI Yanbin, LIU Jianguo, CHENG Xiangru, et al. The allelopathic effects of returning cotton stalk to soil on the growth of succeeding cotton[J]. Journal of Ecology, 2009, 29(9): 4942-4948. (in Chinese)

[5] 王俊友,董世平,吕黄珍,等. 国内外棉花秸秆收获技术发展状况[C]//中国农业机械学会 2008 年学术年会论文集(上册),2008.

[6] 沈茂. 链条滑轨式棉柴夹持起拔机构设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.
SHEN Mao. The design and simulation study on chain-slide rail type clamping-pulling mechainism of cotton stalks[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)

[7] 张佳喜,汪斑珏,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 Jiaxi, 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)

[8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3): 109-120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190311&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.011. (in Chinese)

[9] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10): 142-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.016. (in Chinese)

[10] 营雨琨,曹肆林,王敏,等. 对辊式棉秆起拔装置的设计及试验[J]. 新疆农垦科技,2018,41(8):22-24.
YING Yukun, CAO Silin, WANG Min, et al. Design and experiment of cotton stalk pullling device with pair roller[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2018, 41(8): 22-24. (in Chinese)

(下转第 152 页)