

点刹递进式棉包缠膜系统设计与试验

赵亚宁¹ 郝付平^{1,2} 韩树杰² 韩科立^{1,2} 冯小川¹ 黄 涛¹

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对国产圆包式采棉机棉包缠膜技术理论研究不足,存在送膜不畅、包边效果不好等问题,设计了一种点刹递进式棉包缠膜系统,主要由送膜机构、点刹拉紧机构和控制单元组成。通过研究棉包点刹拉紧缠膜机理,理论分析了送膜的必要条件、导向器上膜成功的有效区域、以及棉包端部包边形成的边界条件,确定了影响点刹递进式棉包缠膜系统作业性能的主要因素为打包带速度、点刹周期、制动时间与进膜时间比值(制动比),以平均棉包包边宽度、平均棉包密度为试验指标开展了三因素三水平二次回归响应面试验,建立了回归模型,分析各因素对棉包缠膜系统作业性能的影响,得到了点刹递进式棉包缠膜系统最佳工作参数为:打包带速度 156 r/min,点刹周期1 200 ms,制动比为 1.2,以此参数组合进行验证试验,得到棉包的平均包边宽度为 160 mm,平均棉包密度 193 kg/m³,试验结果与理论优化值相差不超过 5%。

关键词: 圆型棉包; 缠膜系统; 点刹过程; 参数优化

中图分类号: S225.91⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)S2-0173-08

Design and Experiment of Point-braking Type Film Wrapping System of Round Baler Cotton Picker

ZHAO Yaning¹ HAO Fuping^{1,2} HAN Shujie² HAN Keli^{1,2} FENG Xiaochuan¹ HUANG Tao¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the insufficient theoretical research on the existing cotton bale wrapping technology and the issues include frequent blockage in the film feeding process and poor edging effect in domestic round baler cotton picker, a point-braking type film wrapping system was designed. The system mainly consisted of film feeding device, point-braking tensioning device, and control unit. By studying the film wrapping mechanism of cotton round bales, the necessary conditions for film feeding, the effective area of successful film feeding on the guide device, and the boundary conditions for the formation of edge wrapping at the ends of the cotton package were theoretically analyzed. A three-factors, three-levels quadratic regression orthogonal test was conducted with packing belt speed, point-braking cycle, the ratio of braking time to film feeding time (referred to as the braking ratio) as the test factors, and the average edge width of the cotton package and the average cotton bale density as the test indexes. A regression model was established to analyze the impact of each factor on the film wrapping system. The optimized working parameters was as follows: packing belt speed of 156 r/min, point-braking cycle of 1 200 ms and braking ratio of 1.2. The combination of these parameters was tested in the field, the average edge width was 160 mm and the average cotton bale density was 193 kg/m³. The experimental results differed from the theoretically optimized values by less than 5%. The research results can provide reference for the design of cotton packaging and harvesting machinery.

Key words: round cotton bale; film wrapping system; point-braking process; parameter optimization

0 引言

我国棉花常年种植面积约 $3.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 产量约 $6 \times 10^6 \text{ t}$, 是全球最大的棉花生产国之一。新疆地区光照时间长、气候干燥, 适于棉花种植, 2021 年新疆地区棉花种植面积约 $2.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占全国 83%^[1]。棉花收获是棉花生产中工作量最大、劳动强度最大的环节, 影响棉花综合种植效益^[2]。20 世纪 90 年代, 我国新疆地区引进美国凯斯 2 行采棉机进行机采模式的探索与验证, 确定水平摘锭式采棉模式适合我国棉花生产, 开始引进美国迪尔公司、凯斯公司生产的采棉机, 同时国产采棉机的研制开始起步, 随后我国机采棉技术快速发展^[3], 2022 年我国新疆地区棉花机采率已达到 80% 以上。

长期以来, 国产采棉机以棉箱式采棉机为主, 技术已基本成熟, 性能已与国外品牌相当^[4]。圆包式采棉机能够实现采棉、打包、缠膜联合作业和不停车卸包, 工作效率提升 20% ~ 30%, 打包后的棉花具有储存安全、运输便利、防雨防火等优点, 因此, 近 3 年圆包式采棉机得到广泛应用和发展^[5-8]。美国迪尔公司生产的圆包式采棉机采用前后差速拉紧型式的棉包缠膜技术, 该技术结构复杂, 且受到知识产权保护^[9-11]。在国内, 关于圆包式采棉机的棉包缠膜技术研究尚未见报道, 类似的牧草等收获机的打捆缠膜技术^[12-19], 对草捆两端包边要求不高、缠膜过程中无需拉紧, 不适用于棉花打包缠膜。现有国产圆包式采棉机以研学国外技术为主, 受制于知识产权壁垒, 亟需创新圆包成型、缠膜技术, 因此开发具有自主知识产权的圆包成型、缠膜系统, 对保障国产采棉机行业健康、持续发展, 具有重要意义。

圆型棉包缠膜技术作为圆包式采棉机开发的关键一环, 其性能直接影响整机的作业效果。本文根据圆型棉包缠膜作业的实际需求, 设计一种点刹递进式棉包缠膜系统^[20], 研究缠膜机理, 理论分析送膜的必要条件、导向器上膜成功的有效区域、棉包端部包边形成的边界条件, 通过试验确定最佳工作参数。

1 结构与工作原理

点刹递进式棉包缠膜系统由送膜机构、点刹拉紧机构、控制单元以及相关传感器等组成, 送膜机构主要由前后送膜带、托膜架、托膜架油缸、棉膜导向器等组成, 点刹拉紧机构包括点刹油缸、抱刹板、棉膜测速辊和滚轮等, 如图 1 所示。

点刹递进式棉包缠膜系统工作过程可分为送膜、导入、拉紧和分离 4 个主要步骤。缠膜前, 棉膜前端须置于前送膜带与打包带之间的有效上膜区域

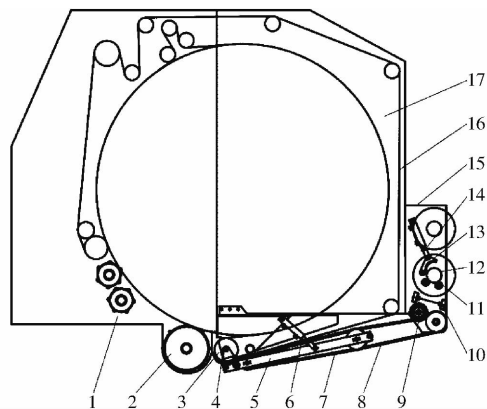


图 1 点刹递进式棉包缠膜系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of point-braking type film wrapping system

1. 打包室前仓 2. 喂入辊 3. 前下打包辊 4. 导向器 5. 托膜架 6. 托膜架油缸 7. 前送膜带 8. 后送膜带 9. 棉膜测速辊 10. 激光对射传感器 11. 滚轮 12. 棉膜卷 13. 抱刹板 14. 点刹油缸 15. 膜卷存放架 16. 打包带 17. 打包室后仓

内。缠膜时, 托膜架油缸缩回, 前送膜带与打包带将棉膜夹紧, 通过摩擦力带动棉膜向前输送至导向器位置。导向器为圆弧形, 棉膜经过时, 沿其末端切线方向做抛物线运动, 接触到棉包时被带入棉包与打包带之间。当识别到棉膜前端信号标签时, 点刹油缸以一定频率伸出、缩回, 推动抱刹板点刹棉膜卷芯轴, 使棉膜在制动时被拉紧, 间歇递进输送。当识别到棉膜后端信号标签时, 点刹油缸延时制动棉膜卷芯轴, 粘接的两张棉膜被分离, 同时使次张棉膜前端置于前送膜带的有效上膜区域内。

2 关键部件设计

2.1 送膜机构

送膜机构安装在打包室后仓下侧, 通过托膜架油缸、旋转销轴与打包室连接。前送膜带连接托膜架上的前带轮与中带轮, 后送膜带连接中带轮和后带轮。棉膜导向器连接在托膜架上。当托膜架油缸缩回时, 托膜架整体绕销轴转动, 使前送膜带紧贴打包带, 打包带带动前送膜带旋转, 前送膜带通过中带轮带动后送膜带旋转, 同时在打包带、前送膜带共同作用下, 将棉膜向棉膜导向器端输送, 如图 2 所示。

2.1.1 棉膜有效输送条件理论分析

棉膜输送的必要条件是打包带、送膜带对棉膜的输送力大于棉膜向前输送的阻力, 才能保证棉膜与送膜带、打包带间不产生滑移。如图 3 所示, 打包带、送膜带与棉膜的接触长度为 L_M , 前送膜带和打包带对棉膜的压力为 F_{N1} 和 F_{N2} , 前送膜带和打包带转动对棉膜产生的摩擦力为 F_{S1} 和 F_{S2} , 膜卷卷出阻力为 F_M 。

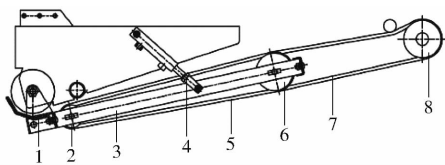


图 2 送膜机构结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of film feeding device

1. 导向器 2. 前带轮 3. 托膜架 4. 托膜架油缸 5. 前送膜带
6. 中带轮 7. 后送膜带 8. 后带轮

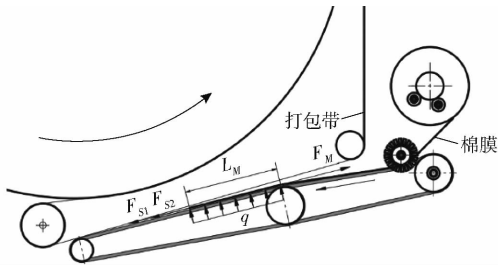


图 3 送膜过程中棉膜运动受力分析

Fig. 3 Force analysis of film in feeding process

棉膜带动膜卷旋转,向前输送,必须满足

$$F_{S1} + F_{S2} > F_M \quad (1)$$

其中

$$F_{S1} = f_1 F_{N1} \quad (2)$$

$$F_{S2} = f_2 F_{N2} \quad (3)$$

$$F_{N1} = F_{N2} = nqL_M \quad (4)$$

式中 f_1 ——棉膜与前送膜带间的摩擦因数

f_2 ——棉膜与打包带间的摩擦因数

n ——送膜带组数

q ——单根送膜带对棉膜施加的载荷, N/m

为了保证棉膜有效输送,打包带、送膜带与棉膜的接触长度应满足

$$L_M > \frac{F_M}{nq(f_1 + f_2)} \quad (5)$$

棉膜伸入前送膜带上的长度满足式(5)条件的区域称为有效上膜区域。前送膜带设计总长为 670 mm,温度 18℃左右时,PE 薄膜与橡胶带间的摩擦因数一般为 0.2 ~ 0.4,取 $f_1 = 0.3$ $f_2 = 0.3$,已测得单根送膜带对棉膜载荷约为 20 N/m,若送膜带布置 4 组,将 $q = 20$ N/m 代入式(5)可得,棉膜与打包带、送膜带的最小接触长度为 417 mm。

2.1.2 导向器角度确定

棉膜经过导向器后沿其末端切线方向抛出,抛出点到上方棉包之间间隙较小,可忽略棉膜因自身重力导致的下坠,棉膜抛出轨迹近似为直线,如图 4 所示。棉膜前端接触到高速旋转的棉包后,沿棉包切线方向带入棉包与打包带之间。

设托膜架抬起后,前下打包辊圆心与导向器末端的连线与竖直方向夹角为导向器角度 θ ,其最小应保证棉膜从导向器上被抛出后其轨迹不与前部喂入辊相交; θ 越大,棉膜越容易被带入棉包与打包带

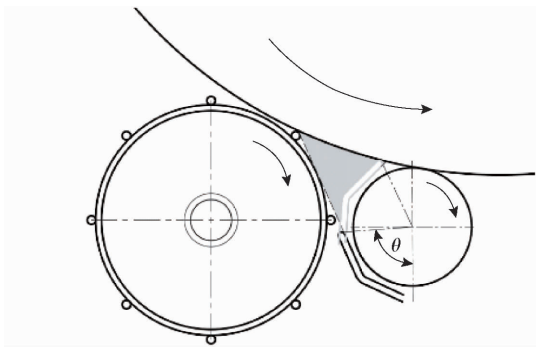


图 4 棉膜运动轨迹示意图

Fig. 4 Diagram of motion trajectory of film

之间,且最大应保证导向器不与棉包发生干涉。由图 4 可得 θ 的理论取值范围为 $90^\circ \sim 155^\circ$ 。

根据前期试验,棉包在喂入辊与后仓前下打包辊之间并非理论圆弧,导向器角度过大时,其容易受棉包挤压变形,导致上膜失败;当 θ 取 105° 左右时,上膜较为顺畅。

2.2 点刹拉紧机构

点刹拉紧机构置于打包室后方,点刹油缸通过销轴安装在棉膜存放架上,油缸杆与抱刹板连接,缠膜时点刹油缸以设定频率推动抱刹板,使棉膜卷短暂停止转动,将棉膜拉紧,间歇递进缠膜,如图 5 所示。

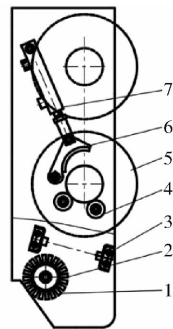


图 5 点刹拉紧机构结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of point-braking tensoning device

1. 测速齿盘 2. 棉膜测速辊 3. 激光对射传感器 4. 滚轮
5. 膜卷 6. 抱刹板 7. 点刹油缸

2.2.1 棉膜拉紧边界条件分析

点刹拉紧机构的拉紧效果与点刹制动时间有关。制动时间过长,棉膜容易断裂;制动时间过短,则无法形成足够的拉紧力。在点刹油缸伸出到下次伸出时的一个周期 T 内,设制动时间为 t_1 ,进膜时间为 t_2 ,有

$$T = t_1 + t_2 \quad (6)$$

不考虑打滑,当点刹油缸制动时,棉膜被拉伸长度 L_1 为

$$L_1 = v_d t_1 \quad (7)$$

式中 v_d ——棉膜线速度, m/s

当点刹油缸松开时,棉膜进膜长度 L_2 为

$$L_2 = v_d t_2 \tag{8}$$

为保证点刹时间内棉膜不被拉断,棉膜的伸长率 δ_c 不得超过该段棉膜的极限伸长率 δ_b ,即

$$\delta_b > \delta_c = \frac{L_1}{L_0 + L_2} \times 100\% \tag{9}$$

式中 L_0 ——伸出但未进入打包室段的棉膜总长, mm

设制动时间与进膜时间之比(制动比)为 k ,可得

$$k < \delta_b \left(\frac{L_0}{v_d t_2} + 1 \right) \tag{10}$$

2.2.2 端部包边形成条件分析

为了使棉包两端形成包边,打包膜宽度须大于棉包宽度,当打包膜进入打包室被拉紧时,包裹在棉包上的棉膜被拉长,包裹的角度变大,棉包两侧宽出的棉膜未被拉伸,被打包室侧壁翻起贴在棉包两端形成包边,若要保证棉包出仓后,包边不起褶皱、不翘起,宽出棉包的棉膜边缘包裹棉包的角度须与棉包圆周上打包膜包裹角度相等,如图6所示。

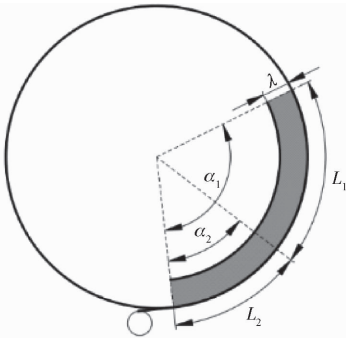


图6 端部包边条件示意图

Fig.6 Diagram of end face edging

理想情况下,棉膜在棉包端部形成的包边宽度 λ 为

$$\lambda = \frac{W_m - W_b}{2} \tag{11}$$

式中 W_m ——棉膜宽度, mm

W_b ——棉包宽度, mm

棉膜进入打包室内被拉伸后覆盖的角度 α_1 为

$$\alpha_1 = 360 \frac{L_1 + L_2}{\pi d} \tag{12}$$

式中 d ——棉包直径, mm

棉包端部未拉伸棉膜包裹角度 α_2 为

$$\alpha_2 = 360 \frac{L_2}{\pi(d - 2\lambda)} \tag{13}$$

当拉伸后棉膜包裹角度恰好等于端部未拉伸棉包包裹角度时,端部包边不翘起,令 $\alpha_1 = \alpha_2$,可得

$$\frac{L_1 + L_2}{L_2} = \frac{d}{d - 2\lambda} \tag{14}$$

将式(7)、(8)代入式(14),可得

$$k = \frac{d}{d - 2\lambda} - 1 \tag{15}$$

由式(15)可以看出,预留 λ 越大,制动比 k 需越大;棉包直径越大,制动比 k 越小。棉包缠膜直径设计为1 500 mm,包边宽度大于100 mm。当棉包直径 $d = 1\,500$ mm、包边宽度 $\lambda = 150$ mm时,得出满足包边要求的理论最小制动比 k 为1.25。

2.2.3 棉膜前端标签位置确定

为了提高棉膜进入打包室的顺畅性,棉膜前端设计为梯形,当梯形区域完全进入打包室,开始启动点刹,使棉包两端形成包边,依此确定前端标签与膜头的距离 L_3 为梯形高度 H 加标签传感器安装位置到打包膜入口的距离,如图7所示。

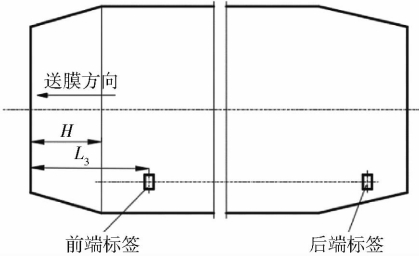


图7 棉膜结构示意图

Fig.7 Structure diagram of film

2.3 棉膜分离延时齿数

为使棉膜能在有效送膜区域内分离,在棉膜后端设置分离标签,当激光对射传感器检测到棉膜后端分离标签后,通过测速齿盘转过的齿数计算棉膜经过的距离。

不考虑打滑,棉膜运动线速度可认为与棉膜测速辊外缘线速度相等,则棉膜在延时时间内经过的距离 L_4 为

$$L_4 = \frac{\pi d_m z}{z_0} \tag{16}$$

式中 z ——延时齿数

z_0 ——测速齿盘齿数

d_m ——棉膜测速辊直径, mm

由前文可知,次张棉膜伸入前送膜带与打包带之间,与前送膜带接触长度应满足式(5),依此确定延时齿数范围。

2.4 棉包缠膜控制系统设计

棉包缠膜控制系统主要由控制器、传感器组、执行元件、显示终端等组成^[21-22],如图8所示。缠膜速度和制动时间等参数可以在显示终端输入。

具体控制流程为:当棉包直径达到缠膜设定的直径,控制器向托膜架油缸控制电磁阀发出油缸缩回信号,托膜架抬起,同时向点刹油缸控制器发出油缸缩回信号,解除膜卷制动,棉膜在打包带的带动下进入打包室;当标签检测传感器感应到

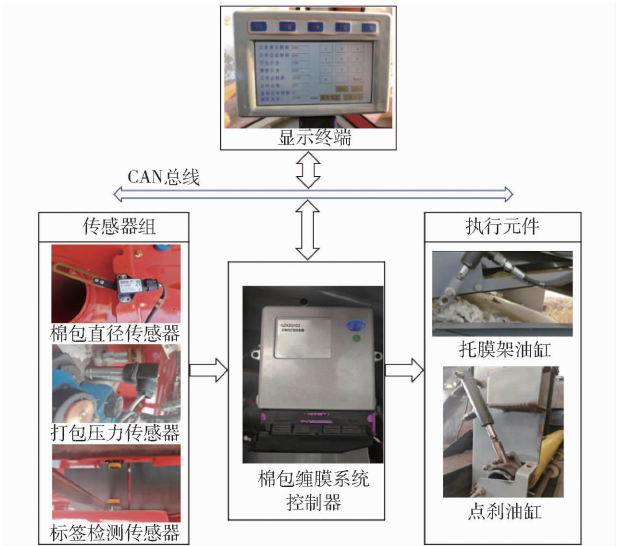


图 8 控制系统组成示意图

Fig. 8 Composition of control system

棉膜前端的点刹启动标签,控制器以一定的点刹频率控制点刹油缸伸缩,实现棉膜拉紧递进;当棉膜后端标签触发,由测速传感器检测测速齿盘转过设定齿数后,向点刹油缸传感器发出伸出信号,制动膜卷芯轴,实现棉膜分离;最后,停止打包辊,控制托膜架油缸缩回,托膜架抬起,控制流程如图 9 所示。

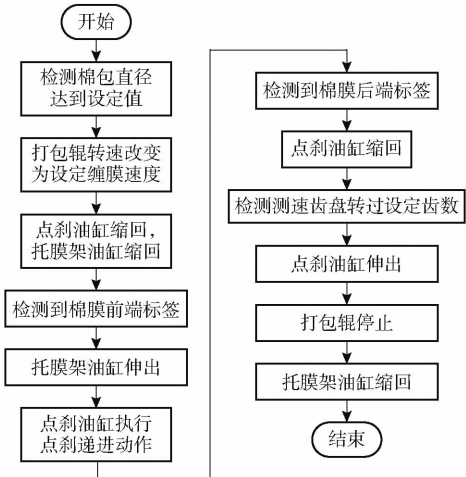


图 9 控制系统流程图

Fig. 9 Flowchart of control system

3 试验

3.1 试验条件

为验证点刹递进式棉包缠膜系统的作业性能,确定其最优工作参数,于 2022 年 11 月 14 日至 12 月 6 日在新疆阿克苏等地棉田进行田间试验,如图 10 所示。试验平台为 4MY-3 型圆包式采棉机,试验初始参数为:打包压力 15 MPa,喂棉辊转速 180 r/min,碎棉辊转速 130 r/min,排棉辊转速 16 r/min,打包直径 1 500 mm。



图 10 田间试验

Fig. 10 Field experiment

试验地地势平坦,试验期间当地平均环境温度为 5℃,测得棉花作物生长情况如表 1 所示。

表 1 棉花作物生长情况

Tab. 1 Cotton growth parameters

参数	数值
棉铃吐絮率/%	≥80
脱叶率/%	≥80
生长高度大于等于 65 cm 占比/%	> 90
最低结铃高度大于等于 18 cm 占比/%	> 90
籽棉含杂率/%	≤11
籽棉产量/(kg·hm ⁻²)	≥3 750

3.2 试验因素与指标

通过前文对点刹递进式棉包缠膜系统工作原理的分析,选取影响缠膜效果的 3 个因素:打包带速度、点刹周期、制动时间与进膜时间比值(简称制动比)作为试验因素。每个因素分别设置 3 个水平,试验因素和编码如表 2 所示。

表 2 试验因素和编码

Tab. 2 Test factors and codes

编码	因素		
	打包带速度/(r·min ⁻¹)	点刹周期/ms	制动比
-1	155	800	1.0
0	160	1 000	1.2
1	165	1 200	1.4

参照 DG/T 025—2022《棉花收获机》,选取平均棉包包边宽度 Y_1 与平均棉包密度 Y_2 为指标对不同参数组合的作业性能进行评价。棉花收获机打包缠膜作业后,测量棉包直径、宽度、质量以及包边宽度,其中,棉包直径的计算方法为测量棉包两端面水平方向和垂直方向直径各 1 次,取平均值;包边宽度的计算方法为测量棉包两端面包边无翘起宽度各 1 次,取平均值。

3.3 试验方案与结果

试验方案采用三因素三水平二次回归响应面试验,选择 Box-Behnken 试验设计方法。人工驾驶采棉机在田间进行连续自动打包作业,每次试验结束,棉包出仓后,测定并记录平均棉包包边宽度,并计算平均棉包密度,试验方案及结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Test plan and result

序号	因素			Y_1/mm	$Y_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	148	191
2	1	-1	0	135	213
3	-1	1	0	170	189
4	1	1	0	155	204
5	-1	0	-1	157	186
6	1	0	-1	145	206
7	-1	0	1	143	199
8	1	0	1	125	218
9	0	-1	-1	153	193
10	0	1	-1	163	189
11	0	-1	1	130	213
12	0	1	1	150	203
13	0	0	0	153	199
14	0	0	0	155	197
15	0	0	0	155	197
16	0	0	0	155	197
17	0	0	0	153	196

3.4 试验结果分析

利用 Design-Expert 对表 3 数据进行方差分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,平均棉包包边宽度 Y_1 与平均棉包密度 Y_2 的回归模型 $P < 0.01$,说明回归模型极显著;决定系数 $R^2 > 0.95$,证明模型可对 95% 以上的试验数据进行拟合。得到二次回归模型为

$$Y_1 = 154.2 - 7.25X_1 + 9X_2 - 8.75X_3 - 0.5X_1X_2 - 1.5X_1X_3 + 2.5X_2X_3 - 4.35X_1^2 + 2.15X_2^2 - 7.35X_3^2$$

(17)

$$Y_2 = 197.2 + 9.5X_1 - 3.12X_2 + 7.38X_3 - 1.75X_1X_2 - 0.25X_1X_3 - 1.5X_2X_3 + 2.4X_1^2 - 0.35X_2^2 + 2.65X_3^2$$

(18)

为了解各因素间相互作用对 Y_1 、 Y_2 的影响,采用 Design-Expert 绘制平均棉包包边宽度和平均棉包密度影响的响应面,如图 11 所示。

由图 11a、11b 可知,对平均棉包包边宽度影响从大到小为点刹周期、制动比、打包带速度。当制动比为 1.2,点刹周期由 800 ms 递增至 1 200 ms 时,平均棉包包边宽度不断增大,打包带速度由 150 r/min 递增至 160 r/min 时,平均棉包包边宽度变小;当打包带速度为 155 r/min,点刹周期固定为 800 ms 时,平均棉包包边宽度随制动比的增大而减小。

由图 11c、11d 可知,影响平均棉包密度的因素从大到小依次为打包带速度、制动比、点刹周期。当制动比为 1、打包带速度固定为 150 r/min 时,平均棉包密度随点刹周期增大而减小;当点刹周期固定为 1 000 ms、制动比固定为 1 时,平均棉包密度随打

表 4 回归模型方差分析
Tab.4 Regression model analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
平均棉包包边宽度 Y_1	模型	2 047.73	9	227.53	66.92	<0.000 1 **
	X_1	420.50	1	420.50	123.68	<0.000 1 **
	X_2	648.00	1	648.00	190.59	<0.000 1 **
	X_3	612.50	1	612.50	180.15	<0.000 1 **
	X_1X_2	1.00	1	1.00	0.294 1	0.604 4
	X_1X_3	9.00	1	9.00	2.65	0.147 8
	X_2X_3	25.00	1	25.00	7.35	0.030 1 *
	X_1^2	79.67	1	79.67	23.43	0.001 9 **
	X_2^2	19.46	1	19.46	5.72	0.048 0 *
	X_3^2	227.46	1	227.46	66.90	<0.000 1 **
	残差	23.80	7	3.40		
	失拟	19.00	3	6.33	5.28	0.070 9
	误差	4.80	4	1.20		
	总值	2 071.53	16			
平均棉包密度 Y_2	模型	1 313.57	9	145.95	61.73	<0.000 1 **
	X_1	722.00	1	722.00	305.38	<0.000 1 **
	X_2	78.12	1	78.12	33.04	0.000 7 **
	X_3	435.13	1	435.13	184.04	<0.000 1 **
	X_1X_2	12.25	1	12.25	5.18	0.057 0
	X_1X_3	0.250 0	1	0.250 0	0.105 7	0.754 6
	X_2X_3	9.00	1	9.00	3.81	0.092 0
	X_1^2	24.25	1	24.25	10.26	0.015 0 *
	X_2^2	0.515 8	1	0.515 8	0.218 2	0.654 6
	X_3^2	29.57	1	29.57	12.51	0.009 5 **
	残差	16.55	7	2.36		
	失拟	11.75	3	3.92	3.26	0.141 5
	误差	4.80	4	1.20		
	总值	1 330.12	16			

注: * 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

包带速度增大而增大。

3.5 参数优化和验证试验

为获得影响点刹式棉包缠膜系统作业效果的最优因素组合,采用 Design-Expert 对建立的二次回归模型进行优化,以提高棉包包边宽度和棉包密度为目标,设置约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

得到的最优因素组合为:打包带速度为156 r/min、点刹周期为 1 200 mm、制动比为 1.2,此时理论棉包包边宽度为 169 mm,棉包密度为 189 kg/m³。

为验证优化后参数组合的准确性,使用优化参数组合重复进行打包缠膜作业 5 次,对试验结果取平均值。结果表明,采用优化参数后,所得棉包成包

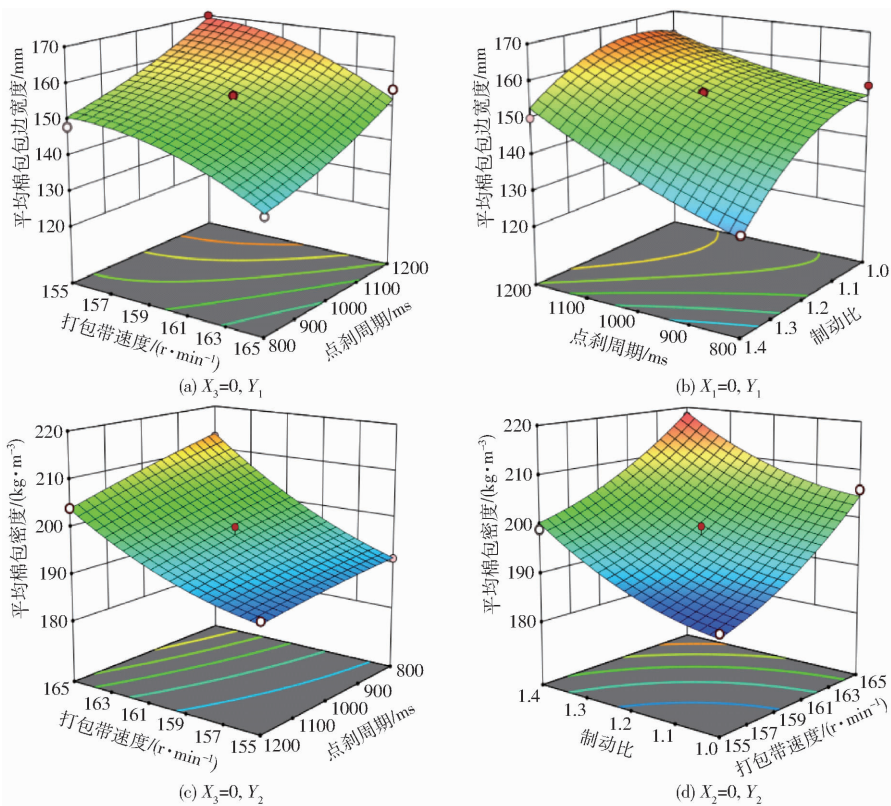


图 11 试验因素对平均棉包包边宽度和平均棉包密度的交互影响

Fig. 11 Interaction effect of test factors on edge width and cotton bale density

率 100%，平均棉包包边宽度 160 mm，平均棉包密度 193 kg/m³，试验结果与理论优化值基本一致，误差不超过 5%，且棉包表面无破损，包边无翘边等现象。分析与理论值产生差异的原因主要是由于棉包出仓后，棉包圆周方向没有了打包带施加的压力，棉包膨胀导致直径变大，平均棉包包边宽度和平均棉包密度减小。

4 结论

(1)设计了一种点刹递进式棉包缠膜系统。通过对送膜机构和点刹拉紧机构作业过程进行分析，

确定了棉膜上膜、拉紧以及棉包端部包边形成的边界条件。

(2)制作了点刹式棉包缠膜装置样机，以打包带速度、点刹周期、制动比作为试验因素，平均棉包包边宽度与平均棉包密度为试验指标进行田间试验，试验结果表明，影响棉包包边宽度的因素由大到小为：点刹周期、制动比、打包带速度；影响棉包密度的因素由大到小依次为打包带速度、制动比、点刹周期；当打包带速度为 156 r/min、点刹周期为 1 200 ms、制动比为 1.2 时，工作效果最优。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2022.

[2] 李腾, 郝付平, 韩增德, 等. 水平摘锭采棉理论分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 233 – 238.
LI Teng, HAO Fuping, HAN Zengde, et al. Theoretical analysis and experiment of picking cotton with horizontal spindle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 233 – 238. (in Chinese)

[3] 牛国梁, 李斌, 刘洋, 等. 我国采棉机发展历程与研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 212 – 218.
NIU Guoliang, LI Bin, LIU Yang, et al. Development and research status of cotton picker in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 212 – 218. (in Chinese)

[4] 雷振华, 蒋智超, 郑红霞, 等. 我国采棉机发展现状及检测方法探讨[J]. 农业机械, 2021(12): 52 – 53, 55.
LEI Zhenhua, JIANG Zhichao, ZHENG Hongxia, et al. Exploration of the current development status and testing methods of cotton pickers in China[J]. Farm Machinery, 2021(12): 52 – 53, 55. (in Chinese)

[5] ALISHER M K, KHUSANOVNA M Z. Research cotton mechanization in Asian countries[J]. Open Access Repository, 2022, 8(3): 22 – 30.

[6] LI H, FU X, ZHANG H, et al. Analysis and experiment of dynamic picking process of spindle of cotton picker[J]. Agriculture, 2019, 12(9): 1346.

[7] 肖霄, 孙奎, 谢方平, 等. 水平摘锭式采棉机采摘系统研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 1 – 9.

XIAO Xiao, SUN Kui, XIE Fangping, et al. Horizontal spindle type cotton picker picking system research status and prospects [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(10):1-9. (in Chinese)

[8] 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)

[9] BENNETT J M, WOODHOUSE N P, KELLER T, et al. Advances in cotton harvesting technology: a review and implications for the John Deere round baler cotton picker[J]. Journal of Cotton Science, 2015, 19(3):225-249.

[10] HUANG T, XIONG Y, LYU Y. Cotton baler: US2022371797[P]. 2022-11-24.

[11] ZHOU Jing. An automatic packing film for a cotton picker: AU2021372956A1[P]. 2022-08-11.

[12] LI Liqiao, WANG Defu, YANG Xing. Study on round rice straw bale wrapping silage technology and facilities [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4): 88-95.

[13] 罗帅,孙志民,张莉,等. 饲草缠膜装备发展现状及展望[J]. 农业装备与车辆工程, 2023,61(4):30-35.
LUO Shuai, SUN Zhimin, ZHANG Li, et al. Development status and prospect of forage wrapping equipment[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023,61(4):30-35. (in Chinese)

[14] 苏佳佳,翟改霞,张平,等. 圆草捆缠膜机设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(2):106-111.
SU Jiajia, ZHAI Gaixia, ZHANG Ping, et al. Design and experiment of round bale wrapper machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(2):106-111. (in Chinese)

[15] 李叶龙,王德福,李东红,等. 辊盘式圆捆机卷捆机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(12):45-52.
LI Yelong, WANG Defu, LI Donghong, et al. Theoretical analysis and experiment of baling mechanism of roll-disk round baler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12):45-52. (in Chinese)

[16] 刘晓,侯加林,杨传龙,等. 青饲料收获打捆包膜一体机的设计与研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(4):16-20.
LIU Xiao, HOU Jialin, YANG Chuanlong, et al. Design and research on integrative machine for harvesting, bundling and wrapping silage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017,38(4):16-20. (in Chinese)

[17] 郑兆启,张超,侍炳鉴,等. 包装机夹持卧带式拉伸膜供送成型装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(4):287-296.
ZHENG Zhaoqi, ZHANG Chao, SHI Bingjian, et al. Design and experiment of the clamping horizontal belt type stretch film feeding and forming device for packaging machines[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 287-296. (in Chinese)

[18] 罗强军. 麦秸打圆捆连续作业关键装置设计与优化[D]. 北京:中国农业科学院,2020.
LUO Qiangjun. Design and optimization of key devices for continuous operation of wheat straw round bales [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)

[19] 杨然兵,王政增,尚书旗,等. 花生联合收获青贮机秧捆包膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):109-117.
YANG Ranbing, WANG Zhengzeng, SHANG Shuqi, et al. Design and test of straw coating device for peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):109-117. (in Chinese)

[20] 郝付平,韩科立,韩增德,等. 一种采棉机及其打包装置、圆包缠膜装置和方法:CN116002144A[P]. 2023-04-25.

[21] 杨杰,金鑫,刘永超,等. 一种包装膜送膜控制系统以及棉花采摘打包设备:CN116081011A[P]. 2023-05-09.

[22] 苗中华,钱钟杨,何创新,等. 采棉机自动圆模打包控制系统及方法:CN114731841A[P]. 2022-07-12.