doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.009

可调式籽棉清理机设计与参数优化研究

吴悦铭[1,2]　张梦芸[1,2]　吴　超[1,2]　吕世豪[1,3]　张若宇[1,2]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832003;
3.兵团智慧农场数字化装备技术创新中心,石河子 832003)

摘要:为实现不同籽棉回潮率下倾斜式籽棉清理机清杂效率及其清理后棉纤维品质的协同优化,设计了一种通过调节椭圆杆转动角度继而改变相邻格条间隙的装置,对其主要结构及工作原理进行了系统阐述,并通过几何计算确定了其参数调节范围为 8.5~12.5 mm。结合回潮率 5.5%~11.5% 下单粒籽棉团质量、破坏力及破坏能的测试结果,选取刺钉辊转速为 560~760 r/min 对清理环节中单粒籽棉团与刺钉之间弹性碰撞过程进行了分析。基于上述试验参数,以刺钉辊转速、籽棉喂入量、相邻格条间隙及籽棉回潮率为试验因素,以机器清杂效率及籽棉短纤维率为评价指标,进行了二次回归正交旋转组合试验设计,得到了评价指标与各试验因素之间的回归方程。并基于带精英策略的非支配排序遗传算法实现了籽棉回潮率-加工参数的映射。多工况验证表明,与未优化前相比,机器清杂效率最高提升 14.14 个百分点,籽棉短纤维率最大降低 11.22 个百分点;不同参数组合下机器清杂效率最大相对误差小于 4.59%,籽棉短纤维率最大相对误差小于 2.80%,证明了回归模型与参数优化的可靠性。

关键词:倾斜式籽棉清理机;相邻格条间隙调节;清杂效率;短纤维率;参数优化

中图分类号:TP309.2;TS101.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0084-13　　**OSID**:

Design and Parameter Optimization of Adjustable Seed Cotton Cleaning Machines

WU Yueming[1,2]　ZHANG Mengyun[1,2]　WU Chao[1,2]　LÜ Shihao[1,3]　ZHANG Ruoyu[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi* 832003, *China*
3. *Innovation Center for Digital Equipment and Technology for Smart Farms, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Aiming to achieve the synergistic optimization of impurity removal efficiency for the inclined seed cotton cleaner and the quality of cotton fibers post-cleaning under varying seed cotton moisture regain levels, the design of a device that adjusted the rotation angle of elliptical rods to modify the gap between adjacent grids was presented. It provided a systematic account of the device's key structure and operating principle, and established the adjustable range of parameters (8.5 ~ 12.5 mm) through geometric calculations. Drawing on the test results of mass, destructive force, and destructive energy of single seed cotton lumps under a moisture regain range of 5.5% ~ 11.5%, the elastic collision process between single seed cotton lumps and spikes during the cleaning stage was analyzed, and the testing range for the spike roller's rotational speed was defined as 560 ~ 760 r/min. Building on the definition of the aforementioned testing parameter ranges, a quadratic regression orthogonal rotational combination experimental design was implemented—with spike roller rotational speed, seed cotton feeding rate, gap between adjacent grids, and seed cotton moisture regained as experimental factors, and the machine's impurity removal efficiency and seed cotton short fiber rate as evaluation indices. From this design, regression equations describing the relationships between the evaluation indices and individual experimental factors were derived. Furthermore, a mapping relationship between seed cotton moisture regain and processing parameters was established by using the non-dominated sorting genetic algorithm

收稿日期:2025-09-30　修回日期:2025-10-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)、兵团科技攻关计划项目(2023AB014)、新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)和国家棉花产业技术体系项目(CARS-15-17)

作者简介:吴悦铭(1998—),男,硕士生,主要从事农业工程技术与装备研究,E-mail:wuyueming3590@163.com

通信作者:张若宇(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事数字棉花技术与装备研究,E-mail:ry248@163.com

with an elitist strategy (here after referred to as NSGA－Ⅱ). Verification tests under multiple operating conditions demonstrated that in comparison with the pre-optimization state, the machine's impurity removal efficiency was enhanced by a maximum of 14.14 percentage points, while the seed cotton short fiber rate was decreased by a maximum of 11.22 percentage points. For different parameter combinations, the maximum relative error associated with the machine's impurity removal efficiency was less than 4.59%, and that for the seed cotton short fiber rate was less than 2.80%, thereby validating the reliability of the regression model and the optimized parameters.

Key words: inclined seed cotton cleaning machine; adjustment of gap between adjacent grids; impurity removal efficiency; short fiber rate; parameter optimization

0　引言

籽棉清理环节作为棉花加工的关键步骤,其清理效果直接影响后续棉纤维品质,籽棉清理机作为籽棉清理的核心设备,当其加工参数与籽棉物料特性不适配时,会降低其清杂效率,导致棉纤维可纺性降低,增加纺纱成本[1-2]。通常随籽棉回潮率降低,其机器清杂效率越高,但过低的回潮率会增加棉纤维损伤,致使棉纤维长度及整齐度呈指数下降,短纤维率上升,进而影响棉花最终品质[3]。

针对不同回潮率下籽棉清理适配性较差的问题,目前研究主要包括 2 个方面:一是进行籽棉回潮率精准调控,从而实现对回潮率科学管理。王昊鹏[4]通过三因素三水平正交回归旋转试验,研究了喂花量、籽棉初始干基含水率和热风温度三因素对籽棉烘干后回潮率的影响;进一步,FENG 等[5]建立了籽棉初始回潮率、目标回潮率与热空气温度之间的关系,并基于 BP 神经网络得到了对应的预测模型,完成了籽棉烘干 PID 控制模型的自动调整。但由于新疆地区棉花加工季节性较强,加工时间短,对于大批量棉花的烘干处理,其实际烘干后籽棉回潮率也不能完全控制在同一水平,只能限定在一定范围内。二是通过优化籽棉清理机加工参数[6],提升其清杂效率。李军乐[7]设计了一种平行四边形的机械结构改变刺钉滚筒与格条栅之间的间隙,但由于工厂大批量生产的需要,此种机械结构对伺服电机要求极高,冲击效果较大,不利于推广。王俊[6]设计了一种可自动调节工作参数的复式籽棉清理机,使用蜗轮蜗杆机构带动格条支撑架向上抬升,实现了刺钉滚筒及格条之间距离的参数化调整,但在实际籽棉清理环节,因设备适应性限制及回潮率动态波动,导致不同回潮率籽棉处理效能受限,清杂效率并没有显著提升。

因此,本文以籽棉回潮率作为加工参数的调控依据,结合不同回潮率下单粒籽棉团质量、破坏力及破坏能的测试结果,通过对单粒籽棉团与刺钉之间弹性碰撞过程的分析确定刺钉辊转速取值区间;以机器清杂效率和清理后籽棉短纤维率为评价指标,开展二次回归正交旋转组合试验;建立刺钉辊转速、相邻格条间隙、籽棉喂入量及籽棉回潮率与评价指标间的预测回归模型,并引入参数解耦策略,基于带精英策略的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ)实现回潮率输入至加工参数输出的映射。最后通过多工况试验验证回归模型及优化结果的可靠性。

1　整机结构与工作原理

可调式籽棉清理机主要结构如图 1 所示。作业

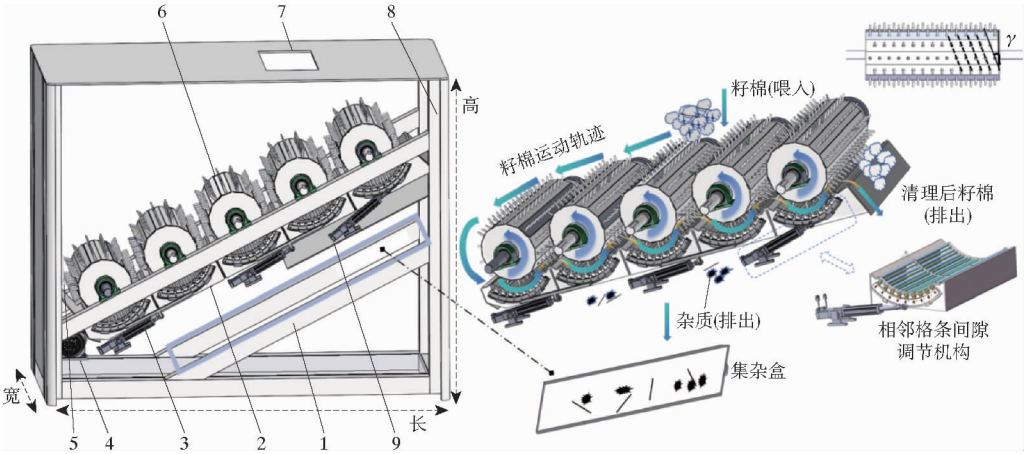


图 1　可调式籽棉清理机整机结构图

Fig. 1　Structural diagram of adjustable seed cotton cleaning machine

1. 机架　2. 格条支撑架　3. 相邻格条间隙调节机构　4. 三相异步电机　5. 弧形腹板　6. 刺钉辊　7. 喂棉口　8. 出棉口　9. 淌杂板

时,未加工的籽棉由上侧喂棉口进入清理腔,在重力影响下向底侧弧形腹板处沉积。由于纤维束的无规则聚簇特性,籽棉极易缠绕于辊筒刺钉上。在两相邻辊筒刺钉的钩拉与撕扯作用下,棉团完成初步开松梳理,包覆于棉团内部的杂质随纤维滑移暴露到表层。同时,经刺钉牵伸后的籽棉团也获得了一定初速度,随辊筒旋转一定角度后,在离心力作用下被抛向格条并产生冲击,该冲击效应促使部分黏附于纤维表面的杂质因振动而抖落分离。在上述梳理、冲击、振动等复合机制作用下,部分杂质经格条间隙滑落至淌杂板;棉团中残留的大杂(如铃壳、棉秆等)由于缺少棉纤维的支撑及自身形状的限制,在刺钉辊持续搅动与后续棉流挤压推动双重作用下,经与下方格条进一步摩擦后从相邻格条间隙中被剥离。最终,清理后的籽棉从前侧出棉口排出,而清除的杂质则沿淌杂板滑落至下侧的集杂盒中。为保障可调式籽棉清理机试验因素的一致性,该机其他主要技术参数如表 1 所示。

表 1 可调式籽棉清理机主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of adjustable seed cotton cleaning machine

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 300×750×2 000
整机质量/kg	2 500
配套功率/kW	15
刺钉辊幅宽/mm	500
刺钉沿辊筒斜向排布角度 γ/(°)	30
刺钉辊与格条栅之间的距离/mm	16
刺钉辊数量	5
刺钉辊最大半径/m	0.2
伺服电动推杆行程/mm	0~250
伺服电动推杆定位精度/mm	0.01

2 装置设计与参数确定

2.1 相邻格条间隙调节机构

2.1.1 机构组成

格条间隙调节机构主要由伺服电动推杆、摆杆、环状摇臂、滑台、椭圆格条、圆格条及格条支架等部件组成,安装结构如图 2 所示。该机构相邻格条间隙的调节,核心是通过改变伺服电动推杆的伸缩距离,从而带动椭圆格条绕其中心轴旋转特定角度,最终使得椭圆格条与相邻圆格条之间的间隙产生变化。该机构动力传递主要由 3 部分组成:动力源为伺服电动推杆,其下端台状支架通过螺栓与机架支撑板固定,伸缩杆经耳轴连接与支架之间形成转动副 Q(低副接触),其轴端通过球铰机构与环状摇臂支杆连接形成转动副 M_1(低副接触)。当动力经连接杆传递至环状摇臂时,推杆沿缸体直线运动 K(低副接触)转换为环状摇臂旋转运动——摇臂下部工字形滑板沿滑台内滑轨形成移动副 F(低副接触)。最终在执行端,环状摇臂驱使摆杆绕椭圆杆中心轴转动一定角度——其下端圆孔经销钉约束沿摇臂上部直槽口定向滑动,形成线接触移动副 S(高副接触),同时上端方形孔带动椭圆格条外侧凸台转动,使得格条绕其椭圆中心 T 作周向旋转(低副接触)实现角度的连续调节。

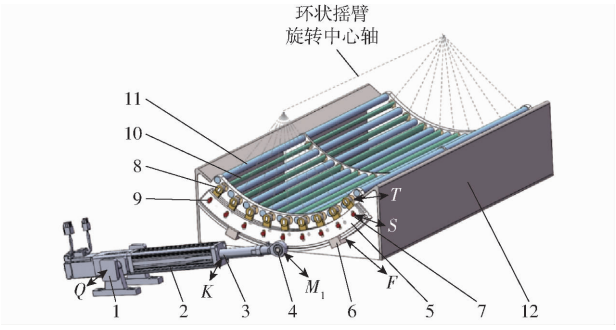


图 2 相邻格条间隙调节机构结构图

Fig. 2 Structure diagram of gap adjustment mechanism of adjacent lattice strips

1. 台状支架 2. 电动推杆 3. 伸缩杆 4. 球铰机构 5. 环状摇臂 6. 滑台 7. 直槽口 8. 摆杆 9. 柱销 10. 椭圆格条 11. 圆格条 12. 格条支架

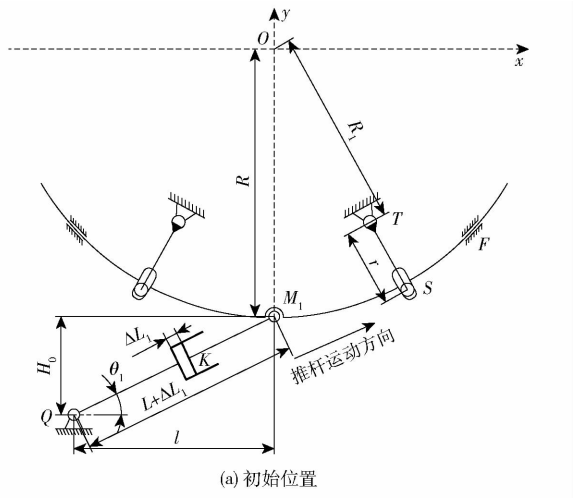
其机构运动简图如图 3 所示。由图 3 可知,该机构含有 4 个运动构件,存在 5 个低副接触与 1 个高副接触。根据平面机构自由度计算公式可知,该机构自由度数等于其原动件数,即具有确定的运动规律(电动推杆伸缩变换最终转换为椭圆格条绕其中心轴线的旋转运动)。

2.1.2 相邻格条间隙参数范围确定

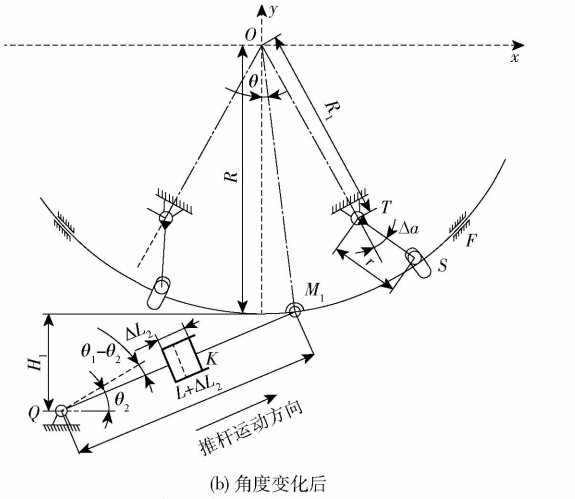
对其机械结构部分进行几何分析,计算椭圆格条旋转角度,进而推算出相邻格条间隙的数值。在初始状态下因电动推杆下层台状支架固定,缸体只能绕其耳轴转动,可简化为点 Q,因电动推杆本身具有一定长度,且推杆与环状摇臂上的连接杆初始为斜向布置,故与水平线之间会出现一定的角度 θ_1,工作时由于推杆运动较为复杂,故需要对其运动轨迹进行分析。如图 3 所示,以环状摇臂的旋转中心点 O 作为坐标原点,初始时竖直直径 OM_1(M_1 为初始推杆与连接杆接触点)位于 y 轴上,M_1 初始坐标:$(0, -R)$,点 Q 初始坐标:$(-l, -R-H)$;当推杆推动环状摇臂绕圆心逆时针旋转角度 θ 后,M_1 新坐标为

$$M_1(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\sin\theta \\ -R\cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

又因点 Q 固定,QM_1 距离公式为



(a) 初始位置



(b) 角度变化后

图 3　相邻格条间隙调节机构运动简图

Fig. 3　Schematics of motion of adjacent lattice gap adjustment mechanism

$$\begin{cases} D(\theta) = \sqrt{(R\sin\theta + 1)^2 + (-R\cos\theta + R + H)^2} \\ D(\theta) = L + \Delta L \\ L = \sqrt{l^2 + H^2} \\ \Delta L = vt \end{cases} \tag{2}$$

式中　l——QM_1 初始水平方向上高度差，mm

H——QM_1 初始竖直方向上高度差，mm

L——电动推杆初始长度，mm

ΔL——伺服电动推杆变化量，mm

v——伺服电动推杆抬升速度，mm/s

R——格条中心轴与环状摇臂旋转中心轴之间的距离，mm

$D(\theta)$——环状摇臂旋转 θ 后电动推杆长度，mm

$$\begin{cases} \dfrac{dD}{dt} = \dfrac{dD}{d\theta}\dfrac{d\theta}{dt} = v \\ \dfrac{dD}{d\theta} = \dfrac{Rl\cos\theta + R(R+H)\sin\theta}{D(\theta)} \end{cases} \tag{3}$$

通过微分链式法则将推杆抬升速度与环状摇臂连接杆沿圆心旋转的角速度进行关联；联立式(1)～(3)得角速度为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{vD(\theta)}{Rl\cos\theta + R(R+H)\sin\theta} \tag{4}$$

求解式(4)并将对应时间 t 代入得 θ，由圆的弧长公式可知

$$\theta R = \Delta\alpha r \tag{5}$$

式中　$\Delta\alpha$——椭圆格条旋转角

r——摆杆两旋转中心之间距离

对数学模型进一步简化，故使 $\Delta\alpha = \alpha$。

如图 4 所示，由于椭圆格条沿圆周均匀布置，取其中之一分析相邻格条间隙数值即可，已知椭圆格条长半轴半径为 a，短半轴半径为 b，初始时长半轴的延长线均交于圆心，即由圆心 O 向椭圆及相邻圆做切线。

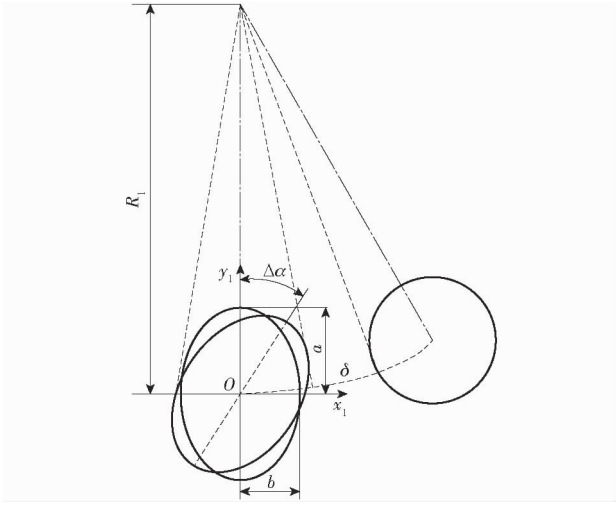


图 4　椭圆格条截面旋转角度变化

Fig. 4　Variation of rotation angle of elliptical lattice section

相邻格条间隙 δ 等于相邻格条切线之间夹角与椭圆及圆中心点所在圆周半径 R_1 的乘积，为使得方程进一步简化，假设椭圆中心点所在坐标为(0,0)，半圆弧圆心所在记为 $O(0,R_1)$。其参数化方程表示为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b\cos\phi \\ a\sin\phi \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中　a——椭圆格条长边半径，取 7.5 mm

b——椭圆格条短边半径，取 4.5 mm

ϕ——椭圆参数角，取 $0 \sim \dfrac{\pi}{2}$

t 时刻椭圆格条旋转 α 后的参数化方程为

$$\begin{cases} x = b\cos\phi\cos\alpha - a\sin\phi\sin\alpha \\ y = b\cos\phi\sin\alpha + a\sin\phi\cos\alpha \end{cases} \tag{7}$$

其对应切点 $P(x(\phi), y(\phi))$ 处切线方程为

$$\begin{cases} \dfrac{xx(\phi)}{b^2} + \dfrac{yy(\phi)}{a^2} = 1 \\ \dfrac{R_1 y(\phi)}{a^2} = 1 \Rightarrow y(\phi) = \dfrac{a^2}{R_1} \end{cases} \tag{8}$$

式中 R_1——椭圆格条旋转中心点与环状摇臂旋转中心轴之间的距离，为 210 mm

根据三角函数线性组合公式

$$\begin{cases}\sqrt{A^2+B^2}\sin(\phi+\gamma)=\dfrac{a^2}{R_1}\\ A=a\cos\alpha\\ B=b\sin\alpha\\ \gamma=\arctan\dfrac{B}{A}=\arctan\dfrac{b\sin\alpha}{a\cos\alpha}\end{cases}\tag{9}$$

解得

$$\phi_1(t)=\arcsin\frac{a^2/R_1}{\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}}-\gamma\tag{10}$$

得到动态切点坐标为

$$\begin{cases}x_{\text{contact}}(t)=b\cos\phi(t)\cos\theta-a\sin\phi(t)\sin\theta\\ y_{\text{contact}}(t)=b\cos\phi(t)\sin\theta+a\sin\phi(t)\cos\theta\end{cases}\tag{11}$$

对应的切线方程可表示为

$$\frac{x}{b}\left(\pm\sqrt{1-\frac{a^2}{R_1^2}}\cos\alpha+\frac{a^2}{bR_1}\sin\alpha\right)+\frac{y}{a}\left(\mp\frac{b}{a}\sqrt{1-\frac{a^2}{R_1^2}}\sin\alpha+\frac{a}{R_1}\cos\alpha\right)=1\tag{12}$$

联立式(5)~(12)可推知相邻格条间隙与对应推杆伸长量的关系式，因其非显式表达故将结果简化为

$$\delta=f(\Delta L)\tag{13}$$

最终确定相邻格条间隙为 8.5~12.5 mm。

2.2 刺钉辊转速调节机构

2.2.1 调节原理

本试验样机刺钉辊之间采用等速传动方案，由三相异步电机提供动力，其输出轴与刺钉辊转轴之间通过弹性 V 带连接，如图 5 所示。样机采用交流电机变频调速原理，通过控制变频器输出频率进而实现对刺钉辊转速调节，三相异步电机转速公式为

$$i=\frac{60f}{p}(1-s)\tag{14}$$

式中 i——转子转速，r/min

f——电源频率，Hz

p——电机极对数 s——转差率

刺钉辊转速与其线速度的转换公式为

$$V=2\pi i_1 h\tag{15}$$

其中 $$i_1=\frac{n}{60}$$

式中 V——线速度，m/s

i_1——刺钉辊转速，r/s

h——刺钉辊半径，m

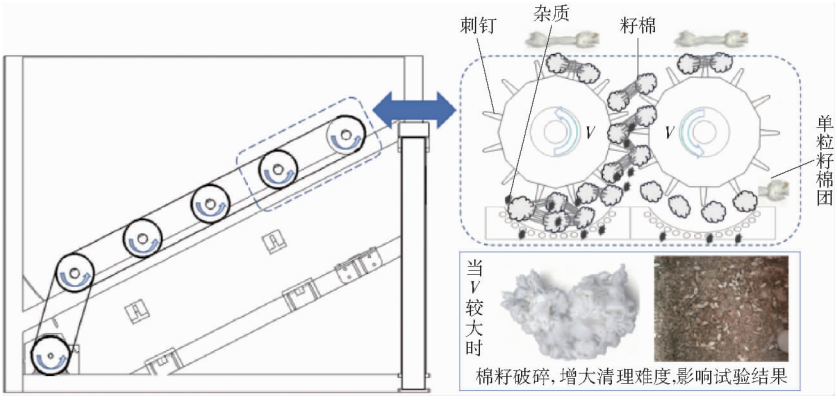


图 5 清理过程中单粒籽棉团形成示意图

Fig. 5 Schematic of formation of single seed cotton during cleaning process

2.2.2 刺钉辊转速选取

为防止因刺钉辊转速过高导致棉籽破碎，干扰籽棉清杂效率及短纤维率试验结果，故首先对不同回潮率籽棉进行物料特性试验。籽棉是指在加工过程中尚未除去棉籽棉花，通常每瓣籽棉中含有 6~8 粒棉籽，棉籽间由长纤维相互连接，但在籽棉清理过程由于刺钉的钩拉作用，棉籽连接处的纤维极易断裂形成单粒籽棉团，如图 5 所示。相较于团簇状籽棉，单粒籽棉团对于棉籽包覆性不强更易产生破碎，故在本试验中以单粒籽棉团为主进行测定。

2.2.2.1 不同回潮率下单粒籽棉团质量

为确保籽棉回潮率范围覆盖典型加工区间[8]，依据 T/SHZSAQS 00106—2022《机采陆地棉籽棉收购标准》要求(籽棉回潮率上限不超过 12%)，采用恒温恒湿箱制备回潮率梯度为 5.5%、7.0%、8.5%、10.0%、11.5% 的籽棉样本。选取各回潮率下样本容量为 50 的单粒籽棉团，并使用 FA2104J 型电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司，量程 0.01~210 g，测量精度 0.000 1 g)对其进行称量。不同回潮率下单粒籽棉团质量分布如图 6 所示，不同回潮率下单粒籽棉团质量的统计结果，如表 2 所示，其中回潮率 5.5%、7.0%、8.5%、10.0%、11.5% 下单粒籽棉团质量均值分别为 0.179 422、0.184 226、0.187 066、0.189 312、0.194 026 g。

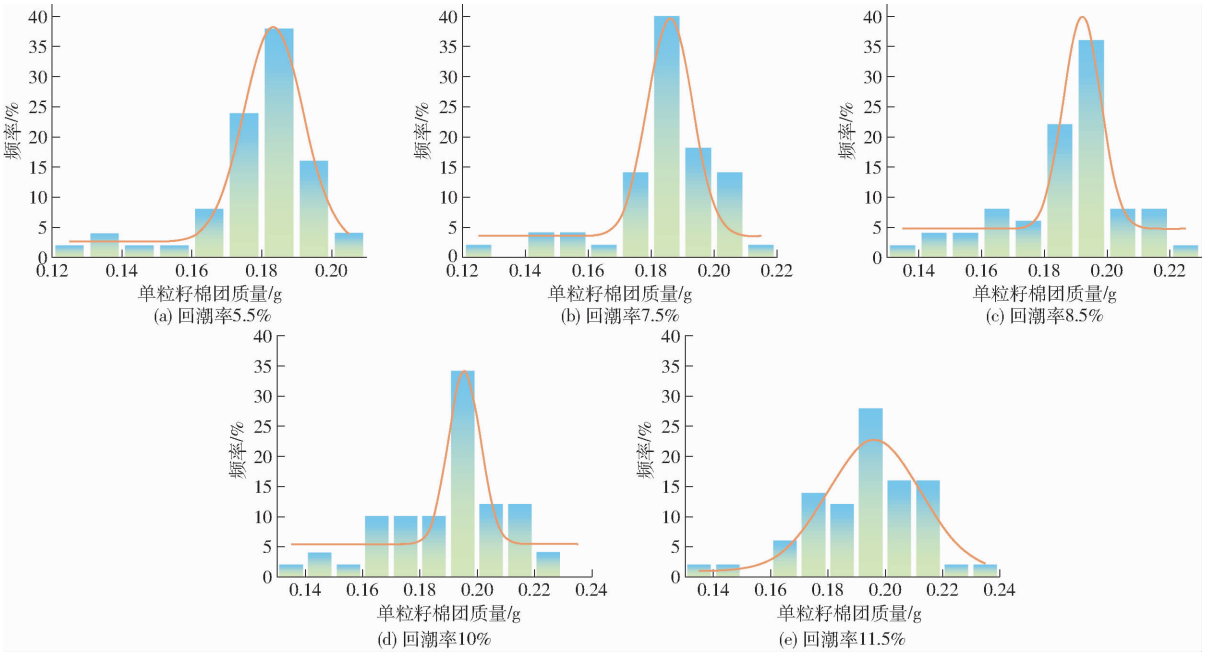


图 6　不同回潮率下单粒籽棉团质量分布直方图

Fig. 6　Histograms of mass distribution of single-seed cotton at different moisture regain rates

表 2　不同回潮率下单粒籽棉团质量

Tab. 2　Statistics of single-grain cotton quality at different moisture regain rates

回潮率/%	样本容量	均值/g	最大值/g	最小值/g	标准差/g
5. 5	50	0. 179 422	0. 201 7	0. 125 1	0. 016 0
7. 0	50	0. 184 226	0. 214 6	0. 128 5	0. 016 6
8. 5	50	0. 187 066	0. 225	0. 135 3	0. 018 9
10. 0	50	0. 189 312	0. 229 2	0. 138 3	0. 019 9
11. 5	50	0. 194 026	0. 232 8	0. 139 4	0. 018 2

2. 2. 2. 2　不同回潮率下单粒籽棉团破碎试验

为了更直观地得到不同回潮率下单粒籽棉团破碎瞬间所承受的载荷力及破坏能，故参考谷子籽粒力学性质及损伤机理，对不同回潮率下单粒籽棉团进行压缩试验[9-10]，选取 TA. XT. Plus 物性分析仪试验模式为压缩模式，采用 100 mm × 90 mm 的压缩底座和 SMS P/36R 型圆柱形压缩探头作为压缩装置。设置测前速度为 1 mm/s，压缩速度为 0. 5 mm/s，测后速度为 2. 0 mm/s，触发力为 0. 049 N，压缩探头与压缩底座之间间距为 20 mm，单粒籽棉团应变 70% 后不再进行压缩，测前将物性分析仪预热 20 min。试验开始前，选取不同回潮率下单粒籽棉团样本置于压缩底座上尽量靠近压缩探头中心的位置，运行物性分析仪加载程序，进行试验。对籽棉破碎试验结果其中 1 组具有代表性的力学线段特征值进行提取，如图 7 所示。

由图 7 可知，单粒籽棉团压缩力与位移曲线具有明显屈服点[10]，在初始加载阶段，籽棉压缩力的大小随位移量的增加呈近似线性增加，且当载荷达

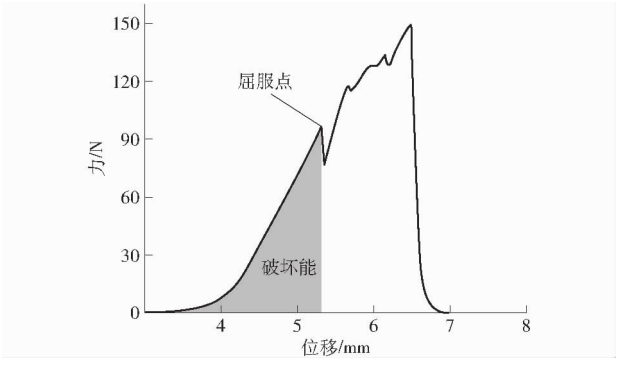


图 7　单粒籽棉团压缩力-位移曲线

Fig. 7　Compressive force - displacement curve of single-grain cotton

到首次峰值后，其值非但不再增加反而减小，而位移量却在持续增大，该现象表明此峰值点即为籽棉的生物屈服点。从微观机制看，生物屈服点对应着细胞结构的破坏；而当压力低于该临界值时，载荷作用仅引发可恢复形变而不会造成实质性损伤。因此，该屈服点载荷被定义为籽棉可承受的最大安全挤压力阈值（即破坏力），而破坏力之前的曲线与位移坐标轴围成的面积（图 7 中阴影区域）即为破坏能[10]。对上述不同回潮率下籽棉破碎试验数据进行处理，得到不同回潮率下单粒籽棉团破坏力及破坏能如图 8、9 所示。

由图 7 可知，对单粒籽棉团与刺钉碰撞过程进行受力分析时，外侧纤维对于单粒籽棉团的受力影响并不显著，即在单粒籽棉团未达到屈服点之前其与刺钉之间的碰撞模型可近似为弹性碰撞。将试验结果的异常值剔除后对其特征值进行提取，并加以

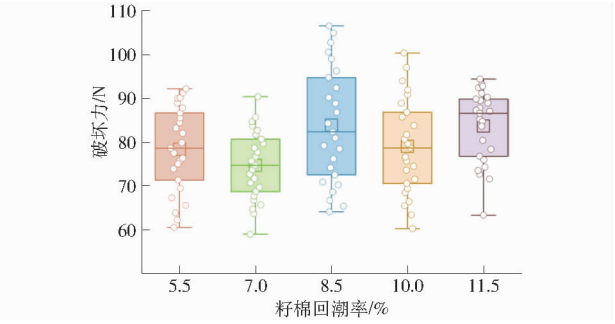


图 8 不同回潮率下单粒籽棉团破坏力

Fig. 8 Destructive force of single-seed cotton at different moisture regain rates

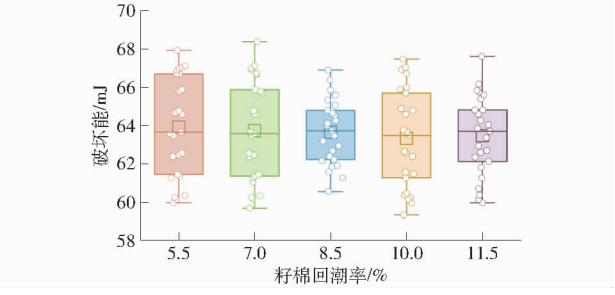


图 9 不同回潮率下单粒籽棉团破坏能

Fig. 9 Breaking energy of single-seed cotton at different moisture regain rates

整理,数值如表 3 所示。

表 3 不同回潮率下单粒籽棉团的最大挤压力和破坏能

Tab. 3 Maximum extrusion force and failure energy of single-seed cotton at different moisture regain rates

回潮率/%	破坏力/N	破坏能/mJ
5.5	76.28 ± 15.85	64.094 ± 4.142
7.0	74.62 ± 15.73	63.663 ± 4.718
8.5	85.90 ± 20.63	63.719 ± 3.176
10.0	80.24 ± 20.08	63.568 ± 3.902
11.5	83.61 ± 20.37	63.517 ± 4.098

2.2.2.3 籽棉运动学分析及刺钉辊转速确定

对单粒籽棉团与刺钉碰撞过程中能量的变化做出如下分析:碰撞过程中刺钉变形忽略不计,初始时刻单粒籽棉团法向初速度为 0,且与刺钉存在相对速度 v(刺钉辊线速度)。在碰撞发生后,单粒籽棉团受刺钉施加的法向载荷 P 作用,局部产生压缩变形致使其与刺钉的相对速度也逐渐减小;直至压缩量达到峰值时,碰撞局部变形量达到最大值 δ;后形变势能转换为动能,单粒籽棉团的部分变形恢复,此时单粒籽棉团与刺钉相对速度降至 0,两者达到同一转速 v。碰撞后因作用力方向发生偏转,单粒籽棉团脱离刺钉,整个碰撞过程随之终止,如图 10 所示。

对其碰撞过程应用 Hertz 理论进行分析[6,11-12],并做出如下假设:不计碰撞过程籽棉与刺钉之间的摩擦作用;在碰撞过程中单粒籽棉团的变形量小于单粒籽棉团和刺钉尺寸,且发生碰撞的两者之间均不发生塑性破坏;单粒籽棉团与刺钉表面接触并逐渐由点成面,接触区域形成半径为 n 的圆形;单粒籽棉团简化为形状均匀、各向同性的球体[13]。在 Hertz 接触中,等效半径 R_e 可表示为[11]

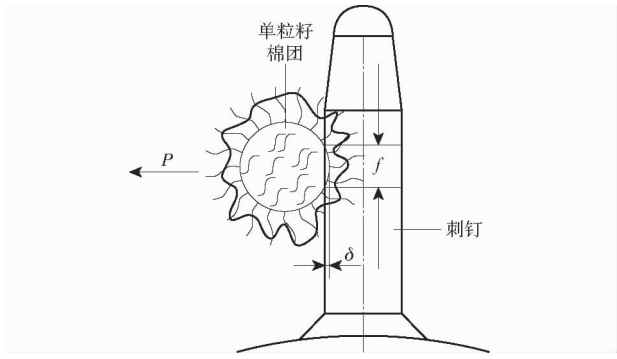


图 10 籽棉-刺钉碰撞过程示意图

Fig. 10 Schematic of collision process between seed cotton and spur nail

$$\frac{1}{R_e}=\frac{1}{R_t}+\frac{1}{R_s} \tag{16}$$

式中 R_t——籽棉与刺钉接触区法向截面半径,mm

R_s——刺钉半径,mm

接触区域的圆形边界方程为

$$A=\pi n^2 \tag{17}$$

其中

$$n=\sqrt[3]{\frac{3PR_e}{4E^*}}=\sqrt{R_e\delta_e} \tag{18}$$

式中 A——接触区域圆形面积,mm^2

E^*——等效弹性模量

δ_e——籽棉不发生破碎的临界变形量,mm

根据 Hertz 理论,最大接触应力 p_y 关系式为

$$p_y=\frac{3P}{2\pi n^2}=\left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3R_e^2}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{19}$$

联立式(16)~(19)解得

$$p_y=\frac{2E^*}{\pi}\sqrt{\frac{\delta_e}{R_e}} \tag{20}$$

籽棉及刺钉弹性模量 E_1、E_2 均由其对应的剪切模量 G 和泊松比 ν 计算,即

$$E=2G(1+\nu) \tag{21}$$

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \tag{22}$$

式中 E_1——籽棉弹性模量

E_2——刺钉弹性模量

ν_1——籽棉泊松比

ν_2——刺钉泊松比

由 Hertz 接触力公式可知,最大接触力 P 与压缩量 δ_e 的关系为

$$P=\frac{4}{3}E^{*}\sqrt{R_e}\delta_e^{\frac{3}{2}} \tag{23}$$

在不发生损伤的临界条件下，碰撞过程前后能量守恒，单粒籽棉团发生屈服破坏的表达式为

$$\frac{1}{2}mv_e^2=\int_0^{\delta_e}P\mathrm{d}\delta=\frac{8}{15}E^{*}\delta_e^{\frac{5}{2}}R_e^{\frac{1}{2}} \tag{24}$$

式中　m——单粒籽棉团质量，g

v_e——籽棉不发生破碎临界接触的相对速度，m/s

联立式(20)～(24)可知，不发生破碎的临界相对速度 v_e 为

$$v_e=\sqrt{\frac{\pi^5R^3p_y^5}{30mE^{*4}}} \tag{25}$$

综上所述，基于对不同回潮率下单粒籽棉团质量的测定，结合籽棉破碎阈值试验结果，代入清理过程中籽棉与刺钉理论碰撞模型进行计算，最终确定刺钉辊安全运行临界转速上限为 815 r/min。为确保后续试验过程的有效性与可靠性，最终将刺钉辊试验转速为 560～760 r/min。

材料物理参数(泊松比、剪切模量)、接触参数[12,14-15](碰撞恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数)见表 4。且孔凡婷等[16]在相同试验条件下，通过对不同含水率籽棉恢复系数测量，得出在籽棉收获时期含水率范围内，籽棉含水率对其恢复系数影响不显著，故下述保持同一参数。

表 4　相应材料的物理参数及接触参数

Tab.4　Physical parameters and contact parameters of corresponding materials

项目	参数	数值
籽棉颗粒	泊松比	0.40
	剪切模量/Pa	8.5×10^8
刺钉(钢)	泊松比	0.30
	剪切模量/Pa	7.7×10^{11}
颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.05
	滚动摩擦因数	0.15
	静摩擦因数	0.55
颗粒-刺钉	碰撞恢复系数	0.10
	滚动摩擦因数	0.20
	静摩擦因数	0.45

3　试验与结果

3.1　材料与设备

试验所用籽棉均产自第六师六运湖农场四连十二队同一试验田同一棉包中的一级细绒棉(品种为中棉 113)。试验设备主要有：自研可调式籽棉清理机(图 11)；原棉回潮率测定仪(陕西华斯特仪器有限责任公司，XJ130－D 型)；电子天平(上海越平科学仪器制造有限公司，YP50002 型)量程为 5 000 g，精度为 0.01 g；恒温恒湿箱(大荣纺仪公司，YG(B)751DG 型)；锯齿衣分试轧机(新乡市红旗区江河机械厂)；原棉杂质分析机(常州一纺仪纺电仪器有限公司，YG041 型)；KX111－Ⅰ型短纤维率快速测试仪、KX111－Ⅱ型棉花制条仪(上海康信光电仪器有限公司)。



(a) 籽棉清理机侧视图　　(b) 籽棉清理机正视图

图 11　籽棉清理机示意图

Fig. 11　Diagram of seed cotton cleaning machine

3.2　方法与指标

3.2.1　试验方法

以同一棉包籽棉为对象，经混料处理后置于恒温恒湿环境((20±2)℃，相对湿度(65±3)%)平衡 24 h，采用五点取样法选取 5 kg 样本作为 12 空白对照组，依据 GB/T 6499—2022《原棉含杂率试验方法》测定初始含杂率；剩余籽棉按 4.8 kg/份分装作为主试验样本，试验前预投 1.2 kg 籽棉进行设备参数标定并清除残留棉，每组参数重复 3 次试验(每次 1.2 kg)，30 组参数共消耗 120 份样本。其中喂入量低水平试验采用每次分批投放的方式，不同回潮率籽棉试验前使用恒温恒湿箱将籽棉调湿至目标回潮率。执行时设备预热至工况稳定，通过输送带以设定喂入量均匀喂棉，按标定棉—样本 1—样本 2—样本 3，顺序连续完成同参数组试验，参数更替时清除残留棉重新预热设备。清理后籽棉重置于标准环境下平衡 24 h 后，取 3 次试验平均值作为含杂率和短纤维率检测结果。

3.2.2　试验指标测定

为避免因喂入量失配引发生产波动对轧花、皮清等后续工艺产生影响，经综合考虑对籽棉喂入量进行参数化控制，以获得适宜实际加工的最优参数。参照 GB/T 19818—2005《籽棉清理机》对其进行标定，即通过恒定机架上侧的输送带转速，定量投放籽棉以实现喂入量控制。所属籽棉处理量即喂入量计算公式为

$$E_t=G/t_\eta \tag{26}$$

式中　E_t——籽棉处理量，kg/s

G——处理籽棉总量,kg

t_η——工作时间,s

其籽棉含杂率检验方法参照 GB/T 6499—2022《原棉含杂率试验方法》执行,机器清杂效率计算公式为

$$\eta_\varepsilon = (Q_1 - Q_2)/Q_1 \times 100\% \tag{27}$$

式中 η_ε——清杂效率

Q_1——清理前籽棉含杂质量平均值,g

Q_2——清理后籽棉含杂质量平均值,g

棉纤维短纤维率是指棉纤维中短于一定长度界限的纤维质量(或根数)占纤维总质量(或根数)的百分率,是检验棉纤维损伤的重要指标之一。其对应的检验方法参照 GB/T 35931—2018《棉纤维棉结和短纤维率测试方法 光电法》执行,本文选用长度界限为 16 mm。棉纤维短纤维率检验样本,均取自上述经不同加工参数同一处理流程下同批次的皮棉,参照 GB/T 6097—2023《棉纤维试验取样方法》标准对其进行取样,后在标准实验室环境(温度(20 ±2)℃、相对湿度(65 ±3)%)下进行短纤维率试验结果测定。

3.3 试验方案及结果

试验以可调式籽棉清理机的机械参数(刺钉辊转速、相邻格条间隙)、籽棉喂入量及籽棉回潮率为试验因素;以籽棉清杂效率、不同参数组合下清理后籽棉的短纤维率为试验指标,采用二次回归正交旋转组合设计方法安排试验[17-20],其因素编码如表 5 所示,试验方案及结果如表 6 所示。

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Test factors and coding

编码	因素			
	刺钉辊转速 x_1/(r·min^{-1})	喂入量 x_2/(kg·s^{-1})	相邻格条间隙 x_3/mm	籽棉回潮率 x_4/%
-2	560	0.1	8.5	5.5
-1	610	0.2	9.5	7.0
0	660	0.3	10.5	8.5
1	710	0.4	11.5	10.0
2	760	0.5	12.5	11.5

3.4 试验结果方差分析

利用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行二次正交回归分析,并进行多元回归拟合,得到可调式籽棉清理机不同机械参数组合下清杂效率 Y_1 及清理后籽棉短纤维率 Y_2 回归方程,并进行显著性分析。试验指标方差分析结果如表 7、8 所示。

由表 7 可知,x_1、x_2、x_3、x_4、x_1^2、x_2^2、x_3^2、x_4^2、x_1x_4 对清杂效率影响极显著($P < 0.01$),x_2x_4 对籽棉清杂效率影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),其他因素对籽棉清杂效率影响不显著($P > 0.05$);将不显著项剔除后重新进行拟合得到机器清杂效率二次多项回归方程为

表 6 试验方案及结果

Tab. 6 Test protocol and results

序号	因素				清杂效率/%	<16 mm 短纤维率/%
	x_1/(r·min^{-1})	x_2/(kg·s^{-1})	x_3/mm	x_4/%		
1	610	0.2	9.5	7.0	46.355 2	25.30
2	710	0.2	9.5	7.0	54.497 3	28.87
3	610	0.4	9.5	7.0	45.023 8	21.40
4	710	0.4	9.5	7.0	54.453 9	29.21
5	610	0.2	11.5	7.0	47.810 6	23.46
6	710	0.2	11.5	7.0	57.501 8	28.99
7	610	0.4	11.5	7.0	49.871 9	15.95
8	710	0.4	11.5	7.0	59.316 0	22.16
9	610	0.2	9.5	10.0	45.232 2	21.45
10	710	0.2	9.5	10.0	49.288 2	18.47
11	610	0.4	9.5	10.0	41.968 7	18.72
12	710	0.4	9.5	10.0	45.234 6	19.73
13	610	0.2	11.5	10.0	47.787 1	19.95
14	710	0.2	11.5	10.0	54.601 9	21.22
15	610	0.4	11.5	10.0	45.838 5	14.13
16	710	0.4	11.5	10.0	46.096 2	18.67
17	560	0.3	10.5	8.5	42.416 4	17.24
18	760	0.3	10.5	8.5	56.741 5	28.13
19	660	0.1	10.5	8.5	52.327 4	24.93
20	660	0.5	10.5	8.5	44.377 6	17.99
21	660	0.3	8.5	8.5	43.940 8	21.13
22	660	0.3	12.5	8.5	48.853 1	17.76
23	660	0.3	10.5	5.5	53.741 7	28.87
24	660	0.3	10.5	11.5	39.395 4	16.53
25	660	0.3	10.5	8.5	43.369 6	18.37
26	660	0.3	10.5	8.5	41.469 0	17.33
27	660	0.3	10.5	8.5	42.768 9	16.89
28	660	0.3	10.5	8.5	41.172 2	17.92
29	660	0.3	10.5	8.5	40.558 9	17.11
30	660	0.3	10.5	8.5	43.028 6	17.43

$$\begin{aligned} Y_1 = {} & 460.132\,31 - 0.911\,522x_1 - 14.455\,23x_2 - \\ & 28.131\,64x_3 + 2.957\,07x_4 - 0.018\,594x_1x_4 - \\ & 8.446\,75x_2x_4 + 0.000\,865x_1^2 + 185.709\,60x_2^2 + \\ & 1.368\,21x_3^2 + 0.627\,160x_4^2 \end{aligned} \tag{28}$$

由表 8 可知,x_4、x_1、x_2、x_4^2、x_1^2、x_2^2、x_3、x_1x_4、x_2x_3、x_1x_2 对籽棉短纤维率影响极显著($P < 0.01$),x_3^2、x_3x_4 对籽棉短纤维率影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),x_1x_3、x_2x_4 对籽棉短纤维率影响不显著($P > 0.05$);将不显著项剔除后重新进行拟合得到短纤维率的二次多项回归方程为

$$\begin{aligned} Y_2 = {} & 381.768\,26 - 0.672\,509x_1 - 91.197\,5x_2 - \\ & 18.653\,83x_3 - 6.584\,56x_4 + 0.152\,25x_1x_2 - \\ & 0.016\,067x_1x_4 - 11.05x_2x_3 + \\ & 0.409\,167x_3x_4 + 0.000\,528x_1^2 + 101.416\,67x_2^2 + \\ & 0.510\,417x_3^2 + 0.588\,519x_4^2 \end{aligned} \tag{29}$$

表 7　机器清杂效率方差分析结果

Tab. 7　Analysis results of variance of machine impurity removal efficiency

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.084 7	14	0.006 0	18.05	<0.000 1 **
x_1	0.026 5	1	0.026 5	79.08	<0.000 1 **
x_2	0.004 0	1	0.004 0	12.08	0.003 4 **
x_3	0.005 6	1	0.005 6	16.65	0.001 0 **
x_4	0.019 0	1	0.019 0	56.61	<0.000 1 **
x_1x_2	0.000 2	1	0.000 2	0.741 7	0.402 7
x_1x_3	0.000 0	1	0.000 0	0.032 2	0.860 0
x_1x_4	0.003 1	1	0.003 1	9.29	0.008 2 **
x_2x_3	0.000 0	1	0.000 0	0.083 3	0.776 9
x_2x_4	0.002 6	1	0.002 6	7.66	0.014 3 *
x_3x_4	0.000 0	1	0.000 0	0.046 0	0.833 1
x_1^2	0.012 8	1	0.012 8	38.32	<0.000 1 **
x_2^2	0.009 5	1	0.009 5	28.23	<0.000 1 **
x_3^2	0.005 1	1	0.005 1	15.32	0.001 4 **
x_4^2	0.005 5	1	0.005 5	16.30	0.001 1 **
残差	0.005 0	15	0.000 3		
失拟	0.004 4	10	0.000 4	3.34	0.097 7
误差	0.000 7	5	0.000 1		
总和	0.089 7	29			

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

表 8　短纤维率方差分析结果

Tab. 8　Analysis results of variance of short fiber rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	552.61	14	39.47	39.13	<0.000 1 **
x_1	98.98	1	98.98	98.13	<0.000 1 **
x_2	72.18	1	72.18	71.55	<0.000 1 **
x_3	26.80	1	26.80	26.57	0.000 1 **
x_4	190.86	1	190.86	189.21	<0.000 1 **
x_1x_2	9.27	1	9.27	9.19	0.008 4 **
x_1x_3	4.14	1	4.14	4.11	0.060 9
x_1x_4	23.23	1	23.23	23.03	0.000 2 **
x_2x_3	19.54	1	19.54	19.37	0.000 5 **
x_2x_4	4.06	1	4.06	4.03	0.063 2
x_3x_4	6.03	1	6.03	5.98	0.027 3 *
x_1^2	47.82	1	47.82	47.41	<0.000 1 **
x_2^2	28.21	1	28.21	27.97	<0.000 1 **
x_3^2	7.15	1	7.15	7.08	0.017 8 *
x_4^2	48.09	1	48.09	47.68	<0.000 1 **
残差	15.13	15	1.01		
失拟	13.64	10	1.36	4.57	0.053 6
误差	1.49	5	0.298 2		
总和	567.74	29			

3.5　试验结果响应面分析

通过 Design-Expert 13 软件对试验结果进行响应面分析，得到各试验因素对试验指标的影响规律，如图 12、13 所示。

由图 12 可知，在加工参数区间内，籽棉回潮率、籽棉喂入量与机器清杂效率之间均呈负相关关系；而刺钉辊转速与清杂效率之间呈正相关关系。由图 12a 可知，在固定籽棉喂入量及相邻格条间隙情况下，随刺钉辊转速（610 ~ 710 r/min）的增加，其机器清杂效率逐渐提高；但随着籽棉回潮率增加其总体趋势有所减弱。原因是刺钉辊转速增加虽在一定程度能提高籽棉的开松效果，使得原本在棉团内部的杂质暴露到了外侧，但随籽棉回潮率增加，其纤维-纤维、纤维-杂质之间的黏附性均有所增强，致使部分杂质从原位置脱离后可能又黏附到了其他位置，造成机器清杂效率降低。由图 12b 可知，在固定刺钉辊转速、相邻格条间隙条件下，随籽棉回潮率和喂入量增加，两者之间的交互作用也随之增强，籽棉清理难度剧增，机器清杂效率骤降。

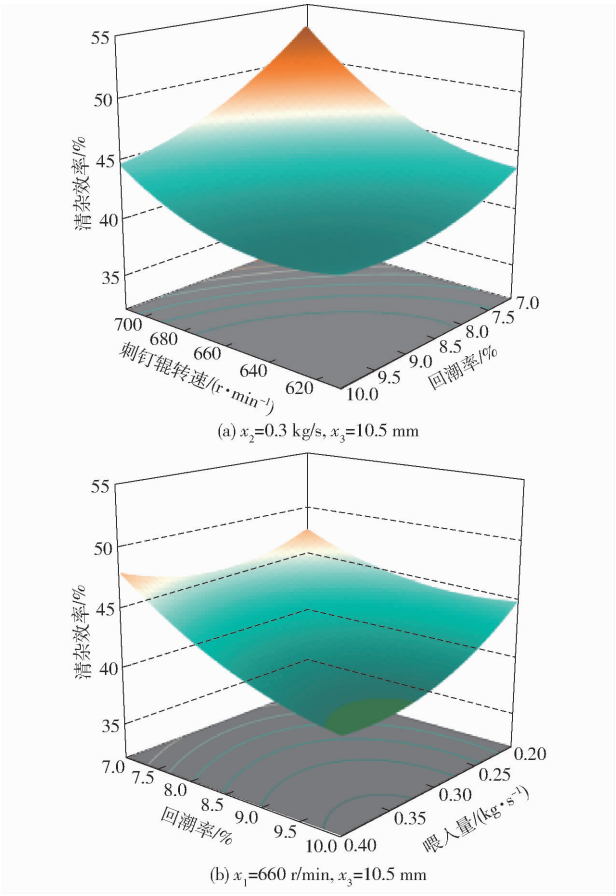


图 12　机器清杂效率双因素影响响应曲面

Fig. 12　Response surfaces affected by two factors of machine cleaning efficiency

由图 13a、13d 可知，相邻格条间隙、刺钉辊转速与籽棉回潮率之间均有明显的交互关系。从图 13 可知，在加工参数区间范围内，相邻格条间隙、籽棉回潮率、籽棉喂入量与籽棉短纤维率之间均呈负相关；而刺钉辊转速与籽棉短纤维率之间呈明显正相关。由图 13a 可知，当籽棉喂入量为 0.3 kg/s、相邻格条间隙为 10.5 mm 时，随回潮率的增加籽棉短纤维率逐渐趋于平缓，但由于刺钉辊转速的提高使得

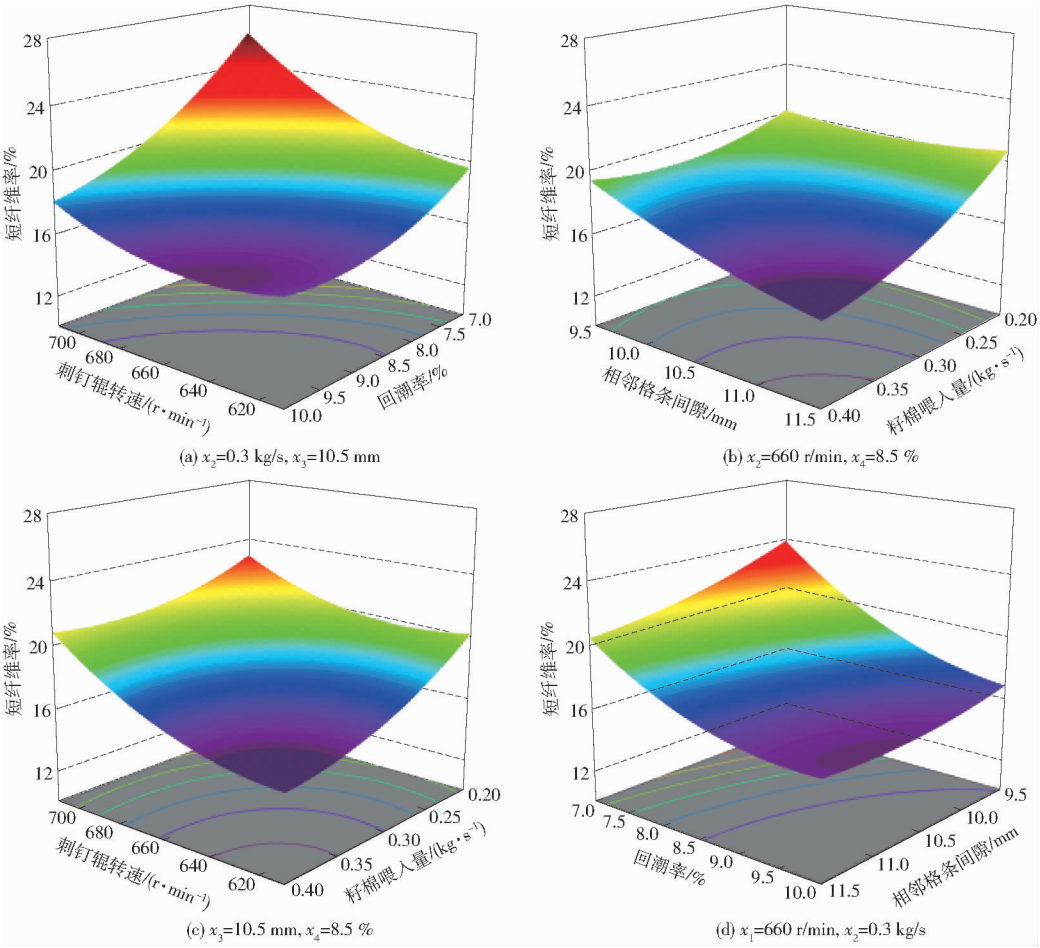


图 13 短纤维率双因素影响响应曲面

Fig. 13 Response surfaces affected by two factors of short fiber rate

这一平缓趋势逐渐变得陡峭。由图 13b 可知,当刺钉辊转速为 660 r/min、籽棉回潮率为 8.5% 时,相邻格条间隙的变化对短纤维的影响在籽棉喂入量较少时并不显著,但随着籽棉喂入量的增加,增大相邻格条间隙导致其短纤维率有了较为明显的下降趋势。由图 13c 可知,当相邻格条间隙为 10.5 mm、籽棉回潮率为 8.5% 时,随籽棉喂入量增多,刺钉辊转速提高对短纤维率的影响愈发显著。由图 13d 可知,当籽棉喂入量为 0.3 kg/s、刺钉辊转速为 660 r/min 时,随着籽棉回潮率增加及相邻格条间隙扩大,短纤维率均呈较为显著的下降趋势。

3.6 参数优化与试验验证

为验证上述机器清杂效率 Y_1 与短纤维率 Y_2 回归模型的可靠性,同时消除籽棉回潮率与可调式籽棉清理机机械参数之间的交互效应、降低模型系统性误差,实现回潮率输入至加工参数的映射,设定如下优化目标:基于预设的籽棉回潮率,代入 Y_1、Y_2 模型进行消元,并应用 NSGA-Ⅱ多目标优化算法[21],合理选取刺钉辊转速 x_1、籽棉喂入量 x_2 及相邻格条间隙 x_3(共 3 个设计变量,其中 x_1、x_2、x_3 的取值均为整数)以同时获得机器清杂效率与籽棉短纤维率的较优值,算法流程如图 14 所示。根据实际作业情况及模型分析结果,该优化问题的约束条件为

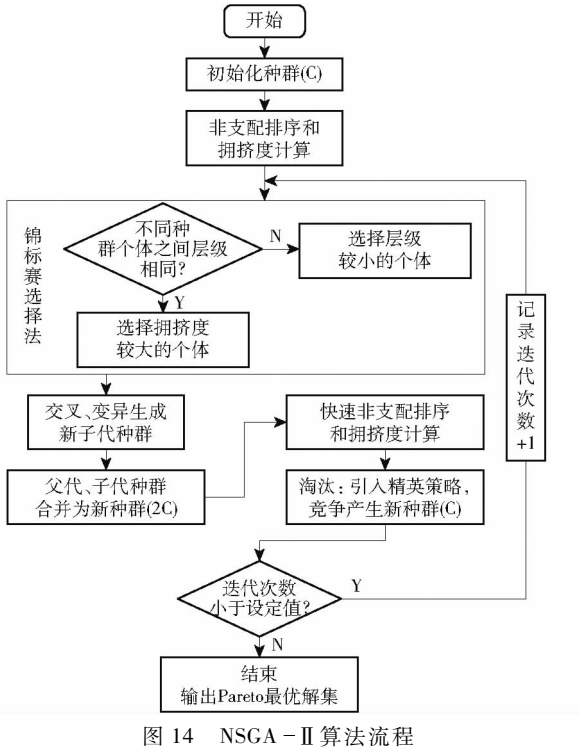


图 14 NSGA-Ⅱ算法流程

Fig. 14 NSGA-Ⅱ algorithm flowchart

$$\begin{cases} x_4 \in (5.5\%、7.0\%、8.5\%、10.0\%、11.5\%) \\ \max Y_1(x_1、x_2、x_3、x_4) \\ \min Y_2(x_1、x_2、x_3、x_4) \text{ 且 } Y_2 < 20\% \\ \text{s.t.} \begin{cases} 560\ \text{r/min} \leqslant x_1 \leqslant 760\ \text{r/min} \quad (\text{步长 } 10\ \text{r/min}) \\ 0.1\ \text{kg/s} \leqslant x_2 \leqslant 0.5\ \text{kg/s} \quad (\text{步长 } 0.1\ \text{kg/s}) \\ 8.5\ \text{mm} \leqslant x_3 \leqslant 12.5\ \text{mm} \quad (\text{步长 } 0.1\ \text{mm}) \end{cases} \end{cases} \tag{30}$$

通过优化求解，得到相应参数如表 9 所示。根据表 9，调制相应回潮率的籽棉样本，并依照对应的加工参数完成对籽棉的清理。同时，以加工厂未优化前倾斜式籽棉清理机的加工参数作为对照组（即固定相邻格条间隙为 10.5 mm、刺钉辊转速为 660 r/min、试验样机喂入量为 0.36 kg/s），在上述相同试验条件下，对同一回潮率下籽棉样本进行 3 次重复试验并取其平均值，最终得到不同回潮率下机器清杂效率及籽棉短纤维率误差带图如图 15、16 所示。

表 9　决策得到的 Pareto 最优解

Tab. 9　Pareto's optimal solution obtained by decision

预设籽棉回潮率/%	刺钉辊转速/(r·min^{-1})	籽棉喂入量/(kg·s^{-1})	相邻格条间隙/mm	清杂效率/%	短纤维率/%
5.5	560	0.5	12.5	70.20	11.34
7.0	560	0.5	12.5	63.22	9.19
8.5	580	0.5	12.5	57.01	9.61
10.0	600	0.5	12.5	53.20	12.14
11.5	640	0.4	11.6	43.44	16.81

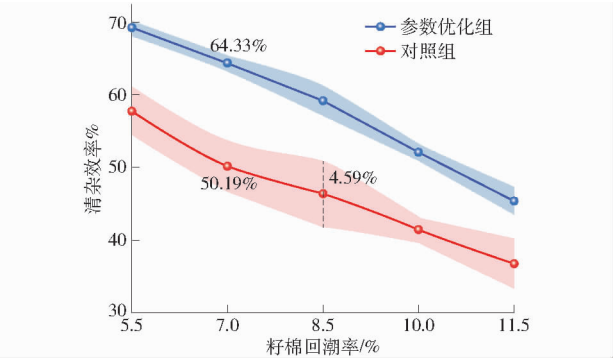


图 15　机器清杂效率误差带

Fig. 15　Machine cleaning and miscellaneous efficiency error

由图 15、16 可知，经多籽棉回潮率工况下验证，同预测模型相比，不同参数组合下机器的清杂效率最大相对误差小于 4.59%，籽棉短纤维率最大相对误差小于 2.80%。较之未参数优化前机器清杂效率及短纤维率在籽棉回潮率为 7% 时提升最大，清杂效率提升 14.14 个百分点，籽棉短纤维率下降 11.22 个百分点。其试验验证结果与优化预测结果基本一致，满足生产需求。

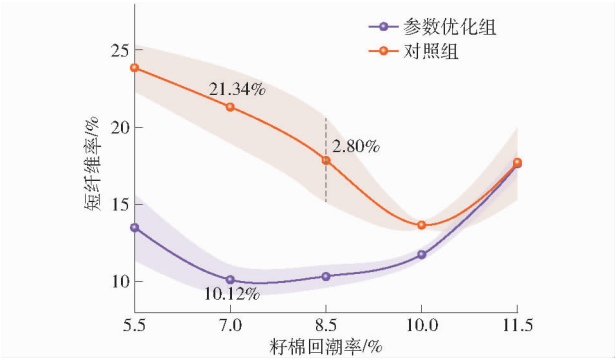


图 16　籽棉短纤维率误差带

Fig. 16　Error band diagram of seed cotton short fiber rate

4　结论

（1）设计了一种通过调节椭圆杆转动角度从而改变相邻格条间隙的装置，并通过几何计算确定了相应格条间隙调节范围为 8.5 ~ 12.5 mm；结合回潮率 5.5% ~ 11.5% 下单粒籽棉团质量、破坏力及破坏能的测试结果，对其清理过程中单粒籽棉团与刺钉之间的碰撞过程进行了分析，确定了刺钉辊转速调节上限应小于 815 r/min，并以此选取刺钉辊转速为 560 ~ 760 r/min。

（2）利用 Design-Expert 13 软件建立了各试验因素与评价指标之间的预测模型，通过方差分析得到了影响机器清杂效率试验因素的主次顺序为刺钉辊转速、籽棉回潮率、相邻格条间隙、籽棉喂入量；影响籽棉短纤维率试验因素的主次顺序为籽棉回潮率、刺钉辊转速、籽棉喂入量、相邻格条间隙。通过响应面分析阐述了各交互效应对评价指标的影响规律。

（3）通过引入参数解耦策略，并基于 NSGA－Ⅱ多目标优化算法以最大化清杂效率和最小化短纤维率为目标，获得了不同籽棉回潮率下的 Pareto 最优参数组合集。多工况验证表明，不同参数组合下机器的清杂效率最大相对误差小于 4.59%，籽棉短纤维率最大相对误差小于 2.80%，试验结果与优化值高度吻合，证明了回归模型的可靠性与优化策略的有效性。

参　考　文　献

[1]　皮赤征，金运海，赵明慧. 2019 年度我国棉花质量和可纺性分析[J]. 中国纤检，2020，2(合刊 Z1)：41.
PI Chizheng，JIN Yunhai，ZHAO Minghui. Analysis of China's cotton quality and spinnability for 2019[J]. China Fiber Inspection，2020，2(Combined issue Z1)：41.（in Chinese）

[2]　ZHANG Yanming，ZHAO Qiming，WU Zhengxue. Effect of moisture regain of cotton roving on spun yarn quality[J]. Advanced

Materials Research, 2012, 627: 279 - 282.
[3] 张鲁云,陈永成. 新疆生产建设兵团机采棉现状及建议[J]. 农业机械, 2011(7): 80 - 82.
[4] 王昊鹏. 棉花加工过程中籽棉预处理关键技术研究[D]. 济南:山东大学, 2014.
WANG Haopeng. Research on the key technologies of seed cotton pretreatment in cotton production process[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014. (in Chinese)
[5] FENG Xianying, GUO Chunli, LI Pengcheng, et al. A study on drying control of seed cotton based on BP neural network model [J]. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 697(1): 012007.
[6] 王俊. 自动调节式籽棉清理机的设计研究[D]. 石河子:石河子大学, 2022.
WANG Jun. Design and research on automatic adjusting seed cotton cleaning machine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)
[7] 李军乐. 数控籽棉清理机的研究与开发[D]. 济南:山东大学, 2010.
LI Junle. Research and development of CNC seed cotton cleaning machine[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
[8] SLUIJS D V M, LONG R. The effect of seed cotton moisture during harvesting on-part 1-fiber quality[J]. Textile Research Journal, 2016, 86(18): 1925 - 1936.
[9] 孙静鑫,杨作梅,郭玉明,等. 谷子籽粒压缩力学性质及损伤裂纹形成机理[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 306 - 314.
SUN Jingxin, YANG Zuomei, GUO Yuming, et al. Compression mechanical properties and crack formation law of millet grain [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 306 - 314. (in Chinese)
[10] 杨作梅,孙静鑫,郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 253 - 260.
YANG Zuomei, SUN Jingxin, GUO Yuming. Effect of moisture content on compression mechanical properties and frictional characteristics of millet grain[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 253 - 260. (in Chinese)
[11] 夏先伟. 复杂耦合气流场下采棉装置数值建模方法与籽棉流动特性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2021.
XIA Xianwei. Research on numerical modeling method of cotton picking device and flow characteristies of seed cotton complex coupled airflow field[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021. (in Chinese)
[12] 孔凡婷,石磊,张玉同,等. 棉箱压实搅龙机构对籽棉压缩作用仿真及分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 77 - 81.
KONG Fanting, SHI Lei, ZHANG Yutong, et al. Simulation and analysis on compression effect of screw conveyor in the hopper on seed cotton[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 77 - 81. (in Chinese)
[13] 张若宇,坎杂,郭文松,等. 机采籽棉残膜分离机籽棉带出机理仿真[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 17 - 21.
ZHANG Ruoyu, KAN Za, GUO Wensong, et al. Simulation on cotton dragout mechanism of mesh roller-type cotton and film remnant separator[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 17 - 21. (in Chinese)
[14] 坎杂,郭文松,张若宇,等. 网状滚筒式机采籽棉残膜分离机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 95 - 99, 401.
KAN Za, GUO Wensong, ZHANG Ruoyu, et al. Design of mesh roller-type separator for machine-harvested seed cotton and film remnant[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 95 - 99, 401. (in Chinese)
[15] 胡文,王迪,陈晓川,等. 锯齿轧花中含棉籽棉朵模型的构建与仿真[J]. 纺织学报, 2020, 41(9): 27 - 32.
HU Wen, WANG Di, CHEN Xiaochuan, et al. Finite element simulation of cotton serrated ginning state based on cottonseed modeling[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(9): 27 - 32. (in Chinese)
[16] 孔凡婷,石磊,张玉同,等. 籽棉碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(1): 92 - 99.
KONG Fanting, SHI Lei, ZHANG Yutong, et al. Measurement and analysis of seed cotton' restitution coefficient in point-to-plate collision model[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(1): 92 - 99. (in Chinese)
[17] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 26 - 34.
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 26 - 34. (in Chinese)
[18] 杨善东,邱田元,马闯,等. 甜菜联合收获机分离输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 191 - 200.
YANG Shandong, QIU Tianyuan, MA Chuang, et al. Design and test of sugar beet combine harvester separation and conveying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 191 - 200. (in Chinese)
[19] 冯金龙,王金武,周文琪,等. 变形椭圆齿轮式扎穴机构设计与工作参数试验优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 90 - 96.
FENG Jinlong, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Design of pricking hole mechanism with deformation elliptical gears and experiment optimization of working parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 90 - 96. (in Chinese)
[20] 徐谐庆,丁为民,张万里,等. 鲜莲子去皮机设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 338 - 349.
XU Xieqing, DING Weimin, ZHANG Wanli, et al. Design and parameter optimization of fresh lotus seeds peeling machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 338 - 349. (in Chinese)
[21] 卜康正,赵勇,郑先昌. 基于 NSGA2 遗传算法的地铁隧道上方基坑工程优化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2): 459 - 467.
BU Kangzheng, ZHAO Yong, ZHENG Xianchang, et al. Optimization design for foundation pit above metro tunnel based on NSGA2 genetic algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 459 - 467. (in Chinese)