

水平摘锭式高效采棉头设计与试验

李 腾¹ 郝付平² 韩增德² 方宪法² 郝朝会² 刘云强²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要:为解决我国棉花高效收获问题,设计了水平摘锭式高效采棉头,针对其关键工作部件槽形凸轮,建立了参数化设计的数学模型,采用 Matlab 中的 GUI 模块进行人机交互可视化设计,生成槽形凸轮曲线,导入 UG 中得到三维模型和工程图纸并加以制造。利用 ADAMS 虚拟样机仿真软件,分析采棉滚筒线速度与作业速度之比 K 对摘锭运动轨迹与采摘时间的影响,得出 K 和作业速度的合理取值范围。利用矢量方程图解法,分析脱棉盘转速与采棉滚筒转速、摘锭转速的匹配关系,得出其取值范围。为验证理论分析和优化高效采棉头的运动参数,搭建采棉头室内综合试验台,选取作业速度、摘锭转速、脱棉盘转速为试验因素,含杂率、撞落棉率、采净率和生产效率为试验指标,采用 Box-Behnken Design 中心组合试验设计原理,利用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析和响应面分析,得到最佳参数组合为:作业速度 6.17 km/h、摘锭转速 4 272 r/min、脱棉盘转速 2 109 r/min,最优参数组合下含杂率为 8.78%、撞落棉率为 1.59%、采净率为 97.17%、生产效率为 0.467 hm²/h,并进行 3 次验证试验,得到平均含杂率为 8.81%、撞落棉率为 1.66%、采净率为 97.21%、生产效率为 0.467 hm²/h,试验结果与理论结果基本相符。

关键词: 棉花采收机; 采棉头; 高效收获; 槽形凸轮; 参数化设计

中图分类号: S225.91⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0063-10

Design and Test of Horizontal Spindle Picking Head with High Efficiency

LI Teng¹ HAO Fuping² HAN Zengde² FANG Xianfa² HAO Zhaohui² LIU Yunqiang²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of high efficient cotton harvesting in China, a horizontal ingot picking head with high-efficiency was developed. A parametric design mathematical model was established for the slot cam, which was the key working part of the picking head. The GUI module in Matlab was used to design human-computer interaction visualization, generate groove cam curve, and imported it into UG to get three-dimensional model and engineering drawings for manufacturing. By using ADAMS virtual prototype simulation software, the influence of the ratio of linear speed to working speed K on the trajectory of ingot picking was analyzed, and the reasonable range of K and working speed was obtained. Vector equation graphic method was used to analyze the matching relationship between the rotational speed of cotton-removal disc and the rotational speed of drum and ingot, and the corresponding range of rotational speed of cotton-removal disc was obtained. In order to verify the theoretical analysis and optimize the motion parameters of the high-efficiency cotton picking head, the indoor comprehensive test bench for the cotton picking head was set up, and the forward speed, the spindle speed and the speed of the cotton disc were selected as the test factors, and the rate of inclusion and the rate of falling cotton were selected. The recovery rate and production efficiency were the test indicators. The second rotation orthogonal test method was used. Regression analysis and response surface analysis of the test results were carried out by using Design-Expert software, and the optimum parameters were obtained as follows: operation speed was 6.17 km/h, spindle picking speed was 4 272 r/min, cotton disc speed was 2 109 r/min. Under the optimum combination of parameters, the impurity content was 8.78%, the

收稿日期: 2019-09-03 修回日期: 2019-10-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701402)

作者简介: 李腾(1990—),男,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: 15600757598@163.com

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化和农业工程技术研究,E-mail: fangxf@caams.org.cn

knock-down cotton rate was 1.59%, the net recovery rate was 97.17%, and the production efficiency was 0.467 hm²/h. Experiments were carried out under the same conditions. The average impurity content was 8.81%, the knock-down rate was 1.66%, the net recovery rate was 97.21%, and the production efficiency was 0.467 hm²/h. The experimental results were basically consistent with the theoretical results.

Key words: cotton harvester; cotton picking head; efficient harvesting; grooved cam; parametric design

0 引言

近年来,由于人工采棉成本的增加,机械化采棉技术在我国发展较快。我国以水平摘锭式采棉机为主,与美国最先进的采棉机相比,在高效采棉方面仍存在差距,需要研究高效采棉头^[1-3]。

近些年来,国内相关学者在传统采棉头(前后都是12列座管)的摘锭运动规律分析与轨迹仿真、凸轮机构的瞬间动力学分析、采棉速比系数*K*的探讨等方面进行了研究,揭示了传统采棉头的采摘规律^[4-8]。文献[9-11]搭建的胶棒滚筒采摘试验台和水平摘锭式采摘头试验台,通过棉株在传送带上输送、而采棉头不动的相对运动来模拟田间收获,脱棉盘没有采用独立驱动。

提高采摘效率的主要途径有2种:提高采摘部件转速和增加座管列数。目前传统采棉头前后滚筒座管列数均为12列,采摘部件转速适当增加后,采净率有所提高,但作业速度没有明显提升。本文通过增加座管列数提高采摘效率,并对其进行结构和运动参数分析,从理论上揭示高效收获规律。通过搭建脱棉盘独立驱动、采棉头输入转速和作业速度无级调节以及棉花植株固定在地面的试验平台,模拟田间收获试验,进行主要运动参数的试验研究,得出最优参数组合,为工程化设计高效采棉头提供参考。

1 采棉滚筒关键部件槽形凸轮结构设计

1.1 采棉头结构与工作原理

如图1a所示,高效采棉头主要由分禾器、前后两个采棉滚筒、栅条、脱棉盘和淋润器等组成。棉株经过分禾器的收拢,进入采棉通道,采棉滚筒通过摘锭缠绕籽棉进行采摘,脱棉盘将缠绕在摘锭上的籽棉脱下后,在气力的作用下输送到集棉箱,淋润器对采摘过程中的籽棉进行湿润并对脱棉后的摘锭进行清洗。

如图1b所示,采棉滚筒主要由传动齿轮系、槽形凸轮、曲拐、拨叉盘、摘锭、座管和底部转盘等组成。通过传动齿轮系,驱动采棉滚筒旋转、经过座管内锥齿轮驱动摘锭旋转,座管在曲拐与槽形凸轮的作用下产生摆动,因此,摘锭的运动由自转、绕采棉

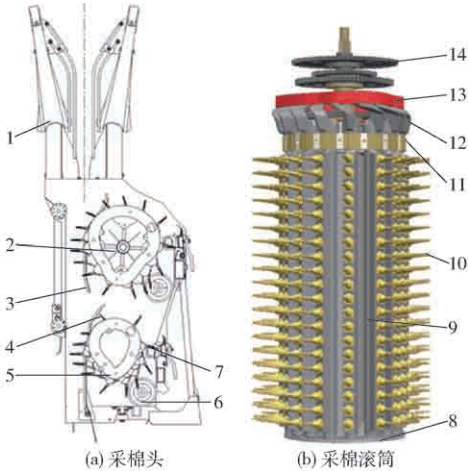


图1 采棉头和采棉滚筒结构图
Fig.1 Structure diagrams of efficient cotton picking head and picking roller

- 1.分禾器 2.前采棉滚筒 3.前部栅条 4.后部栅条 5.后采棉滚筒 6.脱棉盘 7.淋润器 8.底部转盘 9.座管 10.摘锭 11.拨叉盘 12.曲拐 13.槽形凸轮 14.传动齿轮系

滚筒轴线的公转和沿槽形凸轮的摆动组成。

1.2 槽形凸轮参数化设计数学模型

槽形凸轮是采棉滚筒的关键部件,直接影响摘锭的摆动和采棉性能。座管列数增加,凸轮曲线随之发生变化。槽形凸轮需要控制摘锭完成采棉、脱棉和淋润清洗等作业过程,槽形凸轮曲线构成复杂,因此本文通过建立数学模型,实现工程化设计。

为了实现参数化设计,需要从功能要求入手获得数学模型^[12-13]。从采摘示意图(图2)中可以看

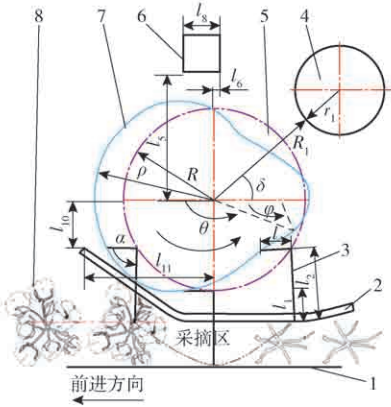


图2 采摘示意图
Fig.2 Schematic of picking cotton

- 1.侧壁板 2.前部栅条 3.摘锭和曲拐 4.脱棉盘 5.采棉滚筒 6.水刷 7.槽形凸轮 8.棉株

出,采棉滚筒旋转 1 周,在槽形凸轮的控制下完成采摘、脱棉、淋润清洗 3 个动作,因此将槽形凸轮曲线划分为引导区、采摘区、采脱过渡区、脱棉区、脱淋过渡区、淋润清洗区和淋润引导过渡区。

槽形凸轮曲线极径表达式为

$$\rho = \sqrt{(R \cos \theta + l \cos(\varphi - \alpha))^2 + (R \sin \theta + l \sin(\varphi - \alpha))^2} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad R = \tau N / 2 \quad (2)$$

式中 ρ ——凸轮导轨中心线极径, mm

R ——座管中心所在圆半径, mm

θ ——采棉滚筒中心和座管中心连线与前进方向的夹角, 逆时针为正, rad

l ——曲臂长度, mm

φ ——座管中心和摘锭尖端连线与前进方向的夹角, 逆时针为正, rad

α ——曲臂与摘锭轴线的夹角, rad

τ ——采棉滚筒模数, mm

N ——座管列数

采棉滚筒模数 τ 为相邻座管所在分度圆的弧长与 π 的比值。

如图 3 所示,槽型凸轮曲线的 7 个区段的边界对应的 θ 值为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 和 θ_8 。角度 φ 不仅和 θ 有关,还与座管极限偏摆角 β (座管绕其中心的最大摆动角) 有关, φ 的范围为 $[\theta - \beta, \theta + \beta]$ 。

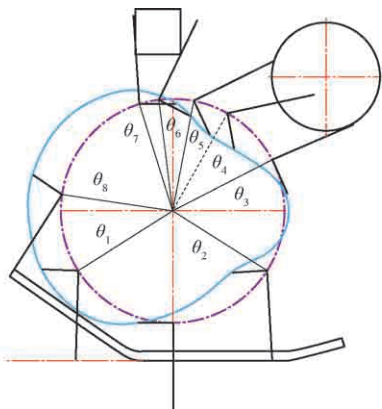


图 3 槽形凸轮曲线区段

Fig. 3 Division of grooved cam area

1.2.1 采摘区数学模型

采摘区是最重要的功能区,它始于 θ_1 ,终于 θ_2 。 θ_1 时摘锭尖端进入采摘区域 (栅条外侧与护板围成的区域),根据位置关系得 θ_1 为

$$\theta_1 =$$

$$\arcsin \frac{R_1 (R + l_2 \cos \beta) + \sqrt{R_1^2 (R + l_2 \cos \beta)^2 - G (R^2 - l_2^2 \sin^2 \beta)}}{G} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad G = R^2 + l_2^2 + 2Rl_2 \cos \beta \quad (4)$$

式中 l_2 ——摘锭端点到座管中心的长度, mm

R_1 ——栅条与采棉滚筒中心垂直距离, mm

G ——进入采摘区域时采棉滚筒中心与摘锭端点距离的平方, mm^2

在 $\theta \in [\theta_1, \frac{\pi}{2}]$ 时有

$$\varphi_1 = \theta_1 + \beta \quad (5)$$

此区间内 φ 可以表达为

$$\varphi = \theta + \frac{\beta(\pi - 2\theta)}{\pi - 2\theta_1} \quad (6)$$

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时, $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 。

此区间,摘锭穿出栅条的长度逐渐增加,对待摘棉花植株的采摘能力增强;座管总成向前摆动,与采棉滚筒旋向相反,摘锭在前进方向的合速度降低,对棉花植株碰撞强度减小,从而减少了棉枝碰断和棉桃撞落。

当 $\theta \in [\frac{\pi}{2}, \theta_2]$ 时有

$$\theta_2 = \pi - \theta_1 \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \theta_2 - \beta \quad (8)$$

此区间,摘锭开始回缩,摘锭逐步退出采摘区。摘锭轴线垂直于前进方向可以减少缠绕在摘锭上的籽棉掉落,减少挂枝棉。

当 $\theta \in [\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} + \beta]$ 时, $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 。当 $\theta \in [\frac{\pi}{2} + \beta,$

$\theta_2]$ 时座管回摆, $\varphi = \theta - \beta$ 。

1.2.2 采脱过渡区数学模型

此区段始于 θ_2 ,终于 θ_3 ,为使槽形凸轮曲线平滑,不计座管摆角 β 的影响, φ 随 θ 值的变化而变化, φ 表达式为

$$\varphi = \varphi_2 + \frac{(\theta - \theta_2)(\varphi_3 - \varphi_2)}{\theta_3 - \theta_2} \quad (9)$$

1.2.3 脱棉区数学模型

脱棉区始于 θ_3 ,终于 θ_5 。 θ_3 为摘锭轴线方向与脱棉盘外圆相切,且摘锭尖端到达脱棉盘位置,此时

$$\theta_3 = \pi + \delta - \arccos \frac{R^2 + R_1^2 + 2Rr_1 - l_2^2}{2R(r_1 + R_1)} \quad (10)$$

$$\varphi_3 = \pi + \theta_3 - \arctan \frac{r_1}{l_2} - \arccos \frac{l_2^2 + R^2 - R_1^2 - 2Rr_1}{2R \sqrt{l_2^2 + r_1^2}} \quad (11)$$

式中 δ ——脱棉盘中心和滚筒中心连线与水平方向的夹角, rad

l_1 ——摘锭带齿工作部分的长度, mm

r_1 ——脱棉盘半径, mm

脱棉区内,为增加脱棉时间,摘锭应回摆 (与采棉滚筒旋转方向相反)。在 θ_4 时,摘锭达到极限摆

动角,得到

$$\varphi_4 = \theta_4 - \beta \tag{12}$$

其中 $\theta_4 = \pi + \delta + \arccos \frac{l_x^2 + R^2 - (l_2 - l_1)^2}{2Rl_x} + \arccos \frac{l_x^2 + (R + r_1)^2 - r_1^2}{2(R + r_1)l_x}$ (13)

$$l_x = \sqrt{(l_2 - l_1)^2 + R^2 + 2(l_2 - l_1)R\cos\beta} \tag{14}$$

$\theta \in [\theta_3, \theta_4]$ 时, φ 和 θ 的关系式为

$$\varphi = \varphi_3 + \frac{(\theta - \theta_3)(\varphi_4 - \varphi_3)}{\theta_4 - \theta_3} \tag{15}$$

θ_5 时,脱棉区结束,摘锭尖端将要离开脱棉盘位置,达到极限偏摆角,根据几何关系得

$$\theta_5 = \pi + \delta \arccos \frac{l_m^2 + R^2 - l_2^2}{2Rl_m} + \arccos \frac{l_m^2 + (R + r_1)^2 - r_1^2}{2(R + r_1)l_m} \tag{16}$$

其中 $l_m = \sqrt{l_2^2 + R^2 + 2l_2R\cos\beta}$ (17)

$$\varphi_5 = \theta_5 - \beta \tag{18}$$

$\theta \in [\theta_4, \theta_5]$ 时, φ 和 θ 的关系式为

$$\varphi = \varphi_4 + \frac{(\theta - \theta_4)(\varphi_5 - \varphi_4)}{\theta_5 - \theta_4} \tag{19}$$

1.2.4 脱淋过渡区数学模型

脱淋过渡区始于 θ_5 ,终于 θ_6 。 φ 和 θ 关系式为

$$\varphi = \varphi_5 + \frac{(\theta - \theta_5)(\varphi_6 - \varphi_5)}{\theta_6 - \theta_5} \tag{20}$$

1.2.5 淋润区数学模型

淋润区始于 θ_6 ,终于 θ_7 。 θ_6 时淋润区开始,摘锭与水刷开始接触,根据位置关系可以得到

$$\theta_6 = \pi + \arccos \frac{l_5}{l_7} + \arccos \frac{l_7^2 + R^2 - (l_2 - l_1)^2}{2Rl_7} \tag{21}$$

$$\varphi_6 = \theta_6 - \pi + \arccos \frac{R^2 + (l_2 - l_1)^2 - l_7^2}{2R(l_2 - l_1)} \tag{22}$$

其中 $l_7 = \sqrt{l_5^2 + l_6^2}$ (23)

式中 l_5 ——水刷与采棉滚筒中心垂直距离,mm
 l_6 ——水刷与采棉滚筒中心水平距离,mm
 l_7 ——水刷右端与采棉滚筒中心距离,mm

θ_7 时摘锭与水刷分离,由位置关系得

$$\theta_7 = \frac{3\pi}{2} + \arccos \frac{l_8 - l_6}{l_7} + \arccos \frac{l_9^2 + R^2 - (l_2 - l_1)^2}{2Rl_9} \tag{24}$$

$$\varphi_7 = \theta_7 - \pi + \arccos \frac{R^2 + (l_2 - l_1)^2 - l_7^2}{2R(l_2 - l_1)} \tag{25}$$

式中 l_8 ——水刷宽度,mm
 l_9 ——水刷左端与采棉滚筒中心距离,mm
 $\theta \in [\theta_6, \theta_7]$ 时, φ 和 θ 的关系式为

$$\varphi = \varphi_6 + \frac{(\theta - \theta_6)(\varphi_7 - \varphi_6)}{\theta_7 - \theta_6} \tag{26}$$

1.2.6 淋润引导过渡区数学模型

淋润引导过渡区始于 θ_7 ,终于 θ_8 。 φ 和 θ 的关系式为

$$\varphi = \varphi_7 + \frac{(\theta - \theta_7)(2\pi + \varphi_8 - \varphi_7)}{\theta_8 - \theta_7} \tag{27}$$

1.2.7 引导区数学模型

引导区始于 θ_8 ,终于 θ_1 ,根据位置关系得

$$\theta_8 = \frac{5\pi}{2} - \arccos \frac{l_{10}}{l_{12}} - \arccos \frac{l_{10}^2 + R^2 - l_2^2}{2Rl_{12}} \tag{28}$$

$$\varphi_8 = \theta_8 - \pi - \arccos \frac{l_{10}^2 + R^2 - l_2^2}{2Rl_{12}} \tag{29}$$

其中 $l_{12} = \sqrt{l_{10}^2 + l_{11}^2}$ (30)

式中 l_{10} ——栅条左端与采棉滚筒中心垂直距离,mm
 l_{11} ——栅条左端与采棉滚筒中心水平距离,mm
 l_{12} ——栅条左端与采棉滚筒中心距离,mm

$\theta \in [\theta_8, \theta_1]$ 时, φ 和 θ 的关系式为

$$\varphi = \varphi_8 + \frac{(2\pi + \theta - \theta_8)(\varphi_1 - \varphi_8)}{2\pi + \theta_1 - \theta_8} \tag{31}$$

1.3 槽形凸轮的可视化设计

基于建立的槽形凸轮数学模型,利用 Matlab 中的 GUI 模块,编制了 7 个区段曲线的生成程序,实现槽形凸轮曲线的可视化设计及工程图纸输出^[14]。通过输入 15 个槽形凸轮参数,即可生成可视化的槽型凸轮曲线,便于判别曲线是否满足作业要求与动力学要求。座管列数增加,采棉滚筒直径增大,有利于提高采摘效率,但受到棉花种植行距的限制,不能无限增加。新疆棉花种植模式一般为 (66 + 10) cm 或 (68 + 8) cm,山东、河北等地机采棉种植模式为单行 76 cm。为适应我国的种植行距,采棉头的最大宽度必须小于 760 mm。如果宽度大于 760 mm,会增加未采摘区棉花的撞落。前滚筒增加到 16 列时,采棉头宽度已经达到 750 mm 左右,已达到我国 76 cm 种植行距的上限,此时的槽形凸轮曲线如图 4 所示。再利用 Matlab 软件,将槽形凸轮曲线数据以 txt 文本形式输出,导入 UG 软件中,引入槽形凸轮宽度、厚度等参数,生成槽形凸轮三维模型和工程图纸,生产制造得到槽型凸轮。实物图如图 5 所示。

2 采棉头主要运动参数的理论分析

座管列数增加到 16 列,设计生成新的槽形凸轮曲线,采棉头的主要运动参数需要进行理论分析,确定其取值范围。

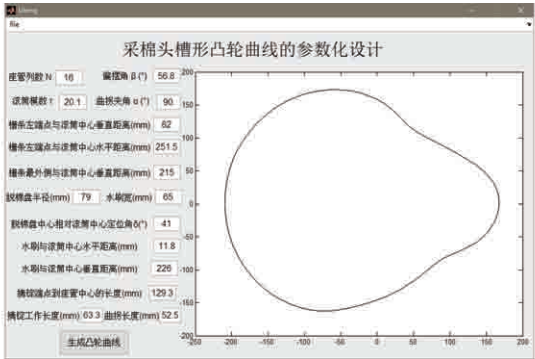


图 4 凸轮曲线设计程序界面

Fig. 4 Cam curve design program interface



图 5 槽形凸轮实物图

Fig. 5 Groove cam entity

2.1 采摘运动参数的理论分析

采棉滚筒线速度与作业速度之比 K (采棉滚筒转速系数) 决定采摘质量^[15], K 定义为

$$K = \frac{\omega_0 R}{v} \tag{32}$$

式中 ω_0 ——滚筒角速度, rad/s

v ——采棉头作业速度, m/s

若 K 与 ω_0 为定值时, v 与 R 成正比, 即增加座管列数, R 增大, 可以提高作业效率。

摘锭前进方向的作用宽度 W 与 K 值相关, W 大, 摘锭前进方向对待摘棉花植株的作用越大, W 过大, 容易引起棉枝折断和棉桃撞落。适宜的 W 应为 46 ~ 48 mm^[16-18]。

选取摘锭尖端作为运动仿真的特征点, 将单个曲拐、槽形凸轮、单组座管和单个摘锭等三维模型导入 ADAMS 软件中, 利用运动学仿真模块, 能够直观地看到运动轨迹 (图 6)。摘锭尖端作用宽度 W 与 K 关系如图 7 所示, W 为 46 ~ 48 mm, 得到 K 合理取值范围为 1.0 ~ 1.3。

K 范围确定后, 再求作业速度的合理范围。通过仿真可求出 K 、作业速度和采摘时间的关系, 如图 8 所示。 K 一定时, 采摘时间与作业速度成反比。根据单摘锭采摘性能研究可知 (摘锭圆锥角为 6.6°, 3 排勾齿), 摘锭采净单朵籽棉的必要时间为 0.13 ~ 0.25 s^[19-20]。再结合 K 的合理取值范围

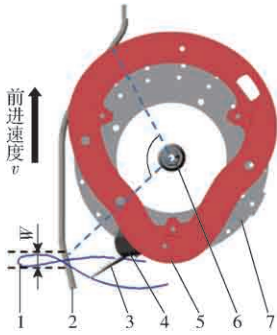


图 6 摘锭尖端运动轨迹仿真结果

Fig. 6 Simulation of tip movement of spindle

1. 摘锭尖端运动轨迹 2. 栅条 3. 摘锭 4. 曲拐 5. 槽形凸轮
6. 滚筒座 7. 底部转盘

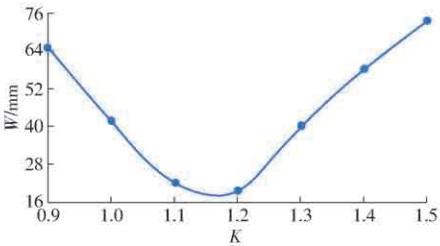


图 7 W 与 K 的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between W value and K value

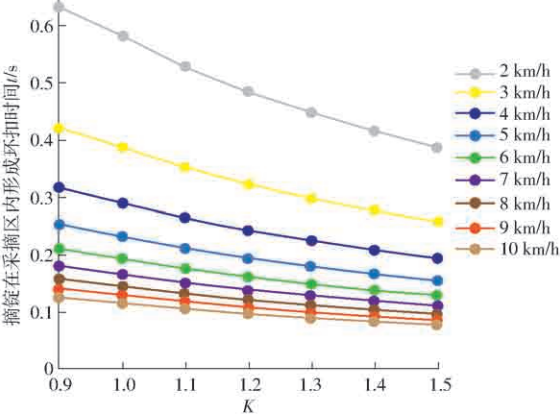


图 8 形成环扣的时间 t 与 K 的关系曲线

Fig. 8 Relationship between time of forming buckle and K value

1.0 ~ 1.3, 得到作业速度为 5 ~ 8 km/h。

2.2 脱棉盘转速分析

摘锭位于脱棉区域时的运动分析如图 9 所示, 将座管和摘锭看作为一个刚体, 座管中心 A 点为基点, B 为摘锭上表面任意一点。

为了保证能将籽棉从摘锭上脱下, 图 9 必须保证 2 个条件: 在摘锭轴线垂直方向, 脱棉盘凸起的分速度必须大于摘锭表面分速度; 摘锭轴线方向, 脱棉盘凸起分速度必须大于摘锭表面分速度^[21], 得

$$\begin{cases} v_3 \cos \sigma < v_o \cos \mu \\ v_3 \sin \sigma - v_1 - v_2 < v_o \sin \mu \end{cases} \tag{33}$$

式中 σ ——摘锭轴线与速度 v_a 的夹角, rad

v_o ——脱棉盘与摘锭表面 B 点接触处的速

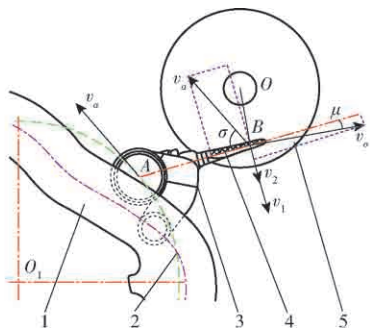


图9 脱棉时摘锭上表面点的运动分析
Fig.9 Motion analysis of surface point of ingot during cotton removal

1. 槽形凸轮 2. 座管中心 3. 曲拐 4. 摘锭 5. 脱棉盘

度,mm/s

μ ——摘锭轴线与速度 v_o 的夹角,rad

v_1 ——摘锭自转在表面 B 点产生的线速度,mm/s

v_2 —— B 点由于曲拐摆动产生的相对于 A 点的转动线速度,mm/s

v_3 ——座管中心 A 点的速度,mm/s

而且有

$$\begin{cases} v_a = \omega_0 r \\ v_1 = \omega_1 l_3 \\ v_o = \omega_2 l_4 \\ v_2 = \omega_3 R_2 \end{cases} \quad (34)$$

式中 ω_1 —— B 点相对于 A 点的角速度(曲拐摆动角速度),rad/s

l_3 —— A 点到 B 点直线距离,mm

ω_2 ——脱棉盘角速度,rad/s

l_4 ——脱棉盘中心点 O 到 B 点距离,mm

ω_3 ——摘锭角速度,rad/s

R_2 —— B 点处摘锭截面半径,mm

将式(34)代入式(33)得到脱棉盘角速度 ω_2 的取值范围为

$$\begin{cases} \omega_2 > \frac{\omega_0 r \cos \sigma}{l_4 \cos \mu} \\ \omega_2 > \frac{\omega_0 r \sin \sigma - \omega_1 l_3 - \omega_3 R_2}{l_4 \sin \mu} \end{cases} \quad (35)$$

结合前文的分析,在 K 取 1~1.3、作业速度为 5~8 km/h 和摘锭转速为 3 000~5 000 r/min 条件下,脱棉盘转速应大于 1 200 r/min。

3 试验材料与方法

为验证理论分析和优化高效采棉头的运动参数,搭建采棉头室内综合试验台,在农业生产机械装备国家工程实验室进行室内试验。

3.1 试验条件

3.1.1 棉花植株

试验所用棉花植株产自天津清河农场,品种为陆地棉 14-2,采用机采棉模式种植。试验时从田间整株拔起带回,并用塑料袋密封存贮。室内试验前随机抽取棉花植株,测量的物理特性如表 1 所示。

表 1 棉花植株主要参数

Tab.1 Main physical parameter of tested cotton	
参数	数值
植株高度/mm	911
植株宽度/mm	495
最高结铃高度/mm	882
最低结铃高度/mm	408
茎秆直径/mm	14.55
棉铃壳含水率/%	6.54
茎秆含水率/%	7.21
籽棉含水率/%	4.18
籽棉脱离棉壳拉伸力/N	0.71
棉铃平均质量/g	5.3
喷洒脱叶剂后脱叶率/%	90

3.1.2 试验台主要组成与工作原理

室内试验台如图 10 所示。采棉头通过悬挂架安装在行走底盘上,棉花植株固定在夹持装置上,模拟田间收获状态。调速电机驱动输棉风机,将采棉头收获的籽棉输送到集棉箱内。行走底盘速度、采棉头锥齿箱输入转速和脱棉盘转速通过液压系统无级调节。

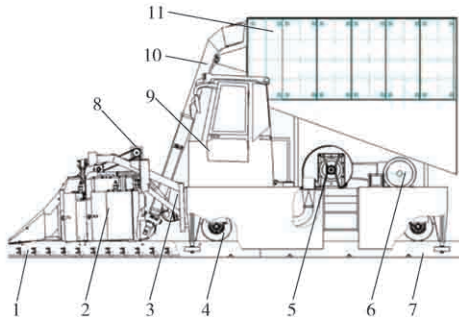


图 10 室内试验台示意图

Fig.10 Schematic of structure of laboratory testing platform

1. 茎秆夹持装置 2. 采棉头 3. 采棉头悬挂架 4. 行走底盘
5. 输棉风机 6. 变频调速电机 7. 平台导轨 8. 传动系统
9. 驾驶操控台 10. 输棉管道 11. 集棉箱

试验台上安装了转速扭矩传感器、激光测距传感器,以及相应的采集控制器和 CAN 通讯模块,上位机操控界面采用 LabVIEW 软件开发。扭矩传感器型号为 CYB-803S,激光测距仪型号 LT300S1XQ,水压控制仪型号为 XMT605。

试验条件为:夹持棉花植株的株距为 120 mm;试验轨道长 40 m;采棉头为前 16 列后 12 列座管组

成的高效采棉头；采棉头与地面悬挂倾斜角为 1.8° ；试验时水压恒定为 130 kPa；输棉风机转速为 2 600 r/min（采棉头底部输棉口风速为 15 m/s）；底盘作业速度为 0 ~ 10 km/h；采棉头锥齿箱输入转速 0 ~ 2 700 r/min；驱动脱棉盘转速 0 ~ 3 000 r/min，满足试验要求。

3.2 试验因素和试验指标

室内试验选取作业速度、摘锭转速、脱棉盘转速为试验因素。根据前文理论分析和传统采棉头的转速范围，确定因素编码，如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	因素		
	作业速度	摘锭转速	脱棉盘转速
	$x_1/(km \cdot h^{-1})$	$x_2/(r \cdot min^{-1})$	$x_3/(r \cdot min^{-1})$
-1	4.8	3 430	1 397
0	6.6	4 022	1 753
1	8.4	4 613	2 109

室内试验采用 GB/T 21397—2008《棉花收获机》进行试验与评价，选取含杂率 y_1 、撞落棉率 y_2 、采净率 y_3 和生产效率 y_4 为试验指标。

每次试验装夹棉花植株 40 株，试验区间分为试验台加速区、速度稳定区和减速区，采摘区为速度稳定区。每次试验结束，清理采摘区地面和集棉箱。试验如图 11 所示。



图 11 试验现场

Fig.11 Experimental scene

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

利用 Design-Expert 8.0.6 软件 Box - Benhnken 响应法进行高效采棉头收获性能试验设计，得到 15 个点的响应面分析试验，其中 12 个析因点，3 个为零点试验用来误差估计。试验设计方案和结果如表 3 所示（ X_1 、 X_2 、 X_3 表示作业速度、摘锭转速、脱棉盘转速的编码值）。

4.2 回归模型的建立与显著性检验

针对表 3 的试验结果，将试验数据进行多元回归拟合分析和方差分析，分别得到含杂率 y_1 、撞落

棉率 y_2 、采净率 y_3 和生产效率 y_4 的二次多项回归拟合方程，分别为

$$y_1 = 8.52 - 0.32X_2 - 0.53X_3 + 0.2X_2X_3 + 0.81X_2^2 + 0.70X_3^2 \tag{36}$$

$$y_2 = 1.94 + 0.071X_1 - 0.04X_2 - 0.21X_3 + 0.047X_1X_2 + 0.3X_1X_3 - 0.21X_2X_3 + 0.34X_2^2 \tag{37}$$

$$y_3 = 96.48 - 0.15X_1 + 0.15X_2 + 0.32X_3 - 0.16X_1X_2 - 0.56X_1X_3 + 0.49X_2X_3 - 0.5X_2^2 \tag{38}$$

$$y_4 = 5.016 \times 10^{-3} + 1.353 \times 10^{-3}X_1 \tag{39}$$

表 3 试验设计方案与结果

Tab.3 Schemes and results of tests

序号	试验因素			试验指标			
	X_1	X_2	X_3	$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$	$y_4/(hm^2 \cdot h^{-1})$
1	-1	-1	0	9.19	2.32	95.99	0.366 3
2	-1	0	-1	9.36	2.41	95.44	0.366 3
3	-1	0	1	8.53	1.57	97.22	0.366 3
4	-1	1	0	9.36	2.07	96.69	0.366 3
5	0	-1	-1	11.91	2.34	96.03	0.501 6
6	0	-1	1	9.88	2.15	95.68	0.501 6
7	0	0	0	8.48	1.84	96.80	0.501 6
8	0	0	0	8.55	1.60	96.95	0.501 6
9	0	0	0	9.18	2.15	96.13	0.501 6
10	0	1	-1	10.10	2.75	95.26	0.501 6
11	0	1	1	8.86	1.73	96.87	0.501 6
12	1	-1	0	9.00	2.49	95.65	0.636 9
13	1	0	-1	9.25	1.84	96.65	0.636 9
14	1	0	1	9.11	2.19	96.18	0.636 9
15	1	1	0	9.13	2.42	95.71	0.636 9

含杂率模型 $P = 0.005\ 2$ ，说明回归方程在置信区间 95% 范围内显著，在统计学上有意义，模型成立。含杂率模型失拟项 $P = 0.322\ 1 > 0.05$ ，表明失拟项 F 的检测结果为不显著，说明回归方程式 (36) 的拟合程度较好。

撞落棉率模型 $P = 0.031 < 0.05$ ，说明回归方程在置信区间 95% 范围内显著，在统计学上有意义，模型成立。撞落棉率模型的失拟项 (Lack of Fit) $P = 0.834\ 5 > 0.05$ ，对模型有利，表明试验误差影响较小，决定系数 $R^2 = 0.841\ 5$ ，表示回归模型的理论值和实际值相关性较好。

采净率模型 $P = 0.018\ 4$ ，说明回归方程在置信区间 95% 范围内显著，在统计学上是有意义的，模型成立。采净率模型失拟项 $P = 0.81 > 0.05$ ，对模型有利，表明试验误差影响较小，决定系数 $R^2 = 0.85$ ，表示回归模型的理论值和实际值相关性较好。

4.3 各试验因素的交互作用影响

为直观分析试验因素与指标间的关系，在建立

好的回归模型的基础上,将其中一个因素固定在零水平,得到其余两因素交互作用对试验指标影响的响应曲面如图 12 ~ 14。

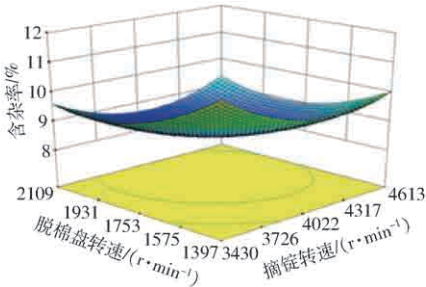


图 12 各因素对含杂率影响的响应曲面
Fig. 12 Response surfaces of each factor on seed cotton trash content

根据图 12 得出,摘锭转速和脱棉盘转速对含杂率存在交互影响,摘锭转速一定时,含杂率随脱棉盘转速的增加先减小后增加,但减小的趋势大于增加的趋势。这可能是因为脱棉盘转速增加将缠紧的棉花松开,有利于杂质掉落或在输送到棉箱过程中从棉箱的网眼中吹走,当超过一定转速范围后,籽棉反向缠紧,反而不利于降低含杂率。脱棉盘转速一定时,含杂率随摘锭转速的增加,先减小后增加。

由图 13a、13b 看出,撞落棉率随摘锭转速的增加先变小后变大,摘锭转速的合理范围为 3 900 ~ 4 400 r/min。这与单摘锭采摘性能的分析趋势相符^[24]。根据图 13 得出,摘锭转速、作业速度和脱棉盘转速对撞落棉率的影响程度依次递减。

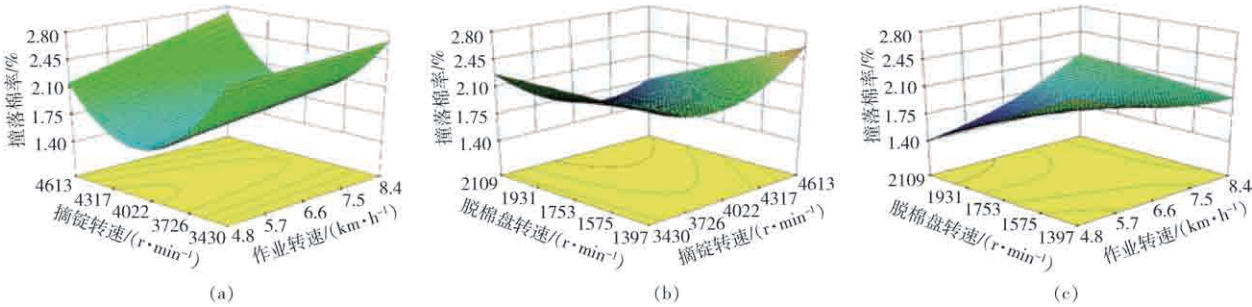


图 13 各因素对撞落棉率影响的响应曲面
Fig. 13 Response surfaces of each factor on rate of fallen cotton

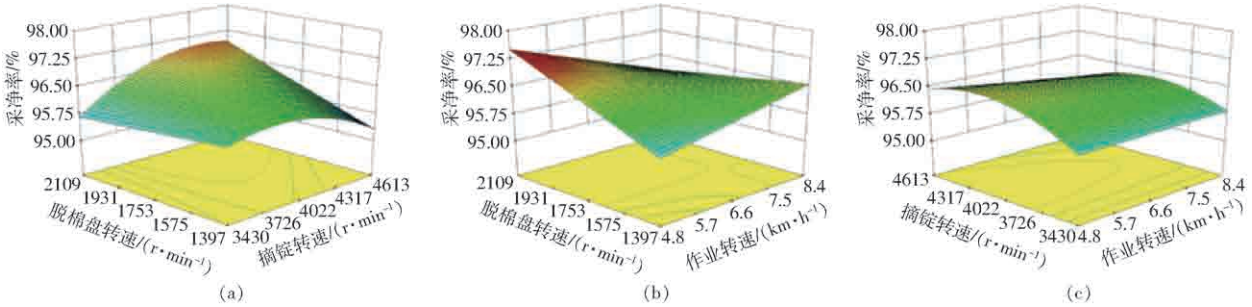


图 14 各因素对采净率影响的响应曲面
Fig. 14 Response surfaces of each factor on rate of picked cotton

根据图 14a、14c 可看出,采净率随摘锭转速的增加有减小的趋势,因为摘锭转速越高,离心力越大,缠绕在摘锭上的籽棉被甩出的机率增加,与单摘锭采摘性能的分析趋势相符^[19]。根据图 14,对采净率影响显著程度由大到小排序为摘锭转速、作业速度、脱棉盘转速。

4.4 最优参数组合与验证

根据建立的采摘性能回归模型,可以得到高效采棉头的最优工作参数组合。在保证收获质量的前提下,尽量降低撞落棉率和含杂率,提高采净率和生产效率,采用多目标变量优化方法,结合试验因素的边界条件,建立非线性规划参数模型为

$$\begin{cases} \min y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \max y_3(x_1, x_2, x_3) \\ \max y_4(x_1, x_2, x_3) \\ y_1 \leq 10\% \\ y_2 \leq 2.5\% \\ y_3 \geq 93\% \end{cases}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 4.8 \text{ km/h} \leq x_1 \leq 8.4 \text{ km/h} \\ 3\,430 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 4\,613 \text{ r/min} \\ 1\,397 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 2\,109 \text{ r/min} \end{cases}$$

(40)

式(40)利用 Design-Expert 8.0.6 软件中优化求解模块,其中采净率、撞落棉率、生产效率和含杂率

的权重分别设置为 0.4、0.3、0.2 和 0.1。得到最优参数组合为: 作业速度 6.17 km/h、摘锭转速 4 272 r/min、脱棉盘转速 2 109 r/min, 最优参数组合下含杂率为 8.78%、撞落棉率为 1.59%、采净率为 97.17%、生产效率为 0.467 hm²/h, 此时滚筒转速为 136 r/min, K 为 1.3。

根据最优参数组合, 在相同的试验环境下, 以相同的试验方法进行 3 次验证试验, 得到的平均含杂率为 8.81%、撞落棉率为 1.66%、采净率为 97.21%、生产效率为 0.467 hm²/h。试验结果与理论结果基本相符, 表明采摘性能回归模型有较好的可靠性。

5 结论

(1) 建立了槽形凸轮的参数化设计模型, 利用 Matlab 中的 GUI 模块编写程序, 通过输入采棉头中与槽形凸轮相关的结构参数生成槽形凸轮曲线, 输出工程图纸, 为高效采棉头设计提供了设计方法。

(2) 通过虚拟样机仿真分析和矢量方程图解

法, 得出高效采棉头采棉滚筒转速系数 K 的合理取值范围为 1.0 ~ 1.3、作业速度为 5 ~ 8 km/h, 脱棉盘转速的理论值应大于 1 200 r/min。

(3) 搭建了集机械、液压、电气、计算机数据采集及控制系统和气力输送于一体的采棉头室内综合试验平台。棉花植株固定在夹持装置上, 模拟田间试验, 实现了脱棉盘转速独立调节和采棉滚筒转速的无级可调, 可满足棉花收获室内试验的要求。

(4) 采用二次旋转正交组合方法设计试验, 利用 Design-Expert 软件的 Optimization 模块对试验结果进行优化分析, 得到高效采棉头最优参数组合: 前进速度 6.17 km/h、摘锭转速 4 272 r/min、脱棉盘转速 2 109 r/min, 并进行了 3 次验证试验, 得到平均含杂率为 8.81%、撞落棉率为 1.66%、采净率为 97.21%、生产效率为 0.467 hm²/h, 试验结果与理论结果基本相符。根据田间经验, 在摘锭转速、滚筒转速和脱棉盘转速相同情况下, 高效采棉头比传统采棉头作业效率提高 20% 左右。

参 考 文 献

- [1] 支丽平, 赵晓晓. 我国棉花机械化技术专利分析研究[J]. 创新科技, 2018, 18(7): 44 - 50.
- [2] 李昊, 李世平, 南灵, 等. 中国棉花地膜覆盖产量效应的 Meta 分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 228 - 235.
LI Hao, LI Shiping, NAN Ling, et al. Meta-analysis of effect of plastic film mulching on cotton yield in China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 228 - 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170729&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.029. (in Chinese)
- [3] 贾彪, 马富裕. 基于机器视觉的棉花氮素营养诊断系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 305 - 310.
JIA Biao, MA Fuyu. Design and experiment of nitrogen nutrition diagnosis system of cotton based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 305 - 310. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160343&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.043. (in Chinese)
- [4] 李世云, 孙文磊. 基于 ADAMS 的采棉机摘锭运动规律分析及轨迹仿真[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 74 - 77, 87.
LI Shiyun, SUN Wenlei. ADAMS-based cotton picker spindle motion analysis and trajectory simulation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 74 - 77, 87. (in Chinese)
- [5] 刘向新, 周亚立, 翟超, 等. 基于采摘质量的采棉机水平摘锭采摘头结构分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 361 - 363.
- [6] 李福海. 摘锭式采棉机凸轮曲拐机构的动力学特性研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
LI Fuhai. Research on the dynamic analysis for cam and crank of spindle-type cotton picker [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese)
- [7] 李福海, 张宏文, 李勇, 等. 摘锭式采棉机凸轮机构的瞬态动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2013(4): 128 - 130.
- [8] 张智明. 水平摘锭式采棉机采摘机构运动学及动力学研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
ZHANG Zhiming. Research on the kinematics and dynamics for picking mechanism of horizontal spindle type cotton-picking machine [D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)
- [9] 张宏文. 胶棒滚筒棉花采摘头关键部件的工作机理与试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
ZHANG Hongwen. The research on the working mechanism and experiment of key component of the rubber-bar roller cotton harvester [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [10] 王磊, 张宏文, 刘巧. 胶棒滚筒棉花采摘头采收性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 35 - 41.
WANG Lei, ZHANG Hongwen, LIU Qiao. Test on harvest performance of cotton picking head with rubber-bar roller [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 35 - 41. (in Chinese)
- [11] 肖宇星, 张宏文. 水平摘锭式采摘头性能综合测试试验台的设计[J]. 中国设备工程, 2017(15): 105 - 106.
- [12] 刘旋峰, 张杰, 乔园园, 等. 残膜回收机凸轮廓线的设计与计算[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 28 - 31.
LIU Xuanfeng, ZHANG Jie, QIAO Yuanyuan, et al. Design and calculation on cam profilogram of plastic residual film collector [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 28 - 31. (in Chinese)
- [13] 申永胜. 机械原理教程[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.

- [14] 陈霓,刘正怀,夏劲松,等.基于 Petri 网模型的收获机轴流式脱分选装置参数化设计[J].农业机械学报,2017,48(11):123-129.
CHEN Ni,LIU Zhenghui,XIA Jingsong,et al. Parametric design for axial flow threshing-separating-cleaning unit based on Petri model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):123-129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.015. (in Chinese)
- [15] 庄力骏,孙颖,陈发,等.关于采棉机速比系数 K 值的探讨[J].新疆农机化,2001(2):28-29.
- [16] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科技出版社,2007.
- [17] 李俊江.弹齿滚筒式棉桃采摘装置的设计研究[D].石河子:石河子大学,2015.
LI Junjiang. Design and research on the cotton boll picking device of spring tooth roller-type[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [18] LI Teng, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Tensile strength experiment of seed cotton pulled out of cotton[C]//2018 ASABE Annual International Meeting, 2018.
- [19] BAKER K D, HUGHS E, FOULK J. Cotton quality as affected by changes in spindle speed[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(3):363-369.
- [20] 李腾,郝付平,韩增德,等.水平摘锭采棉理论分析与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):233-238.
LI Teng,HAO Fuping,HAN Zengde,et al. Theoretical analysis and experiment of picking cotton with horizontal spindle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):233-238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018S031&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.31. (in Chinese)
- [21] 镇江农业机械学院.农业机械理论及设计[M].北京:中国工业出版社,1961.

(上接第 22 页)

- [12] ZHANG Q,ZHANG X,ZHANG J, et al. Branch detection for apple trees trained in fruiting wall architecture using depth features and regions-convolutional neural network (R-CNN)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,155:386-393.
- [13] 黄玲涛,王彬,倪涛,等.基于 Kinect 的机器人抓取系统研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(1):390-399.
HUANG Lingtao,WANG Bin,NI Tao,et al. Research on robotic grasping system based on Kinect camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):390-399. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190145&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.045. (in Chinese)
- [14] 王毅,许洪斌,张茂,等.仿蛇嘴咬合式柑橘采摘末端执行器设计与实验[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):54-64.
WANG Yi,XU Hongbin,ZHANG Mao,et al. Design and experiment of bite-model end-effector for citrus harvesting by simulating with mouth of snake[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):54-64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.007. (in Chinese)
- [15] REDMON J,DIVVALA S,GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[J]. arXiv:1506.02640 [cs.CV], 2015.
- [16] REDMON J,FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]//Computer Vision and Pattern Recognition,2017. IEEE Conference on. IEEE, 2017:6517-6525.
- [17] JOSEPH R,ALI F. YOLOv3: an incremental improvement[J]. arXiv:1804.02767 [cs.CV]. 2018.
- [18] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [19] 徐德,李原,谭民.机器人视觉测量与控制[M].北京:国防工业出版社,2016.
- [20] HARTIGAN J A,WONG M A. Algorithm AS 136: a K-means clustering algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(1):100-108.
- [21] WANG Y,YANG Y,YANG C, et al. End-effector with a bite mode for harvesting citrus fruit in random stalk orientation environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,157:454-470.
- [22] PETER F, BLOESCH M,RODRIGUEZ D, et al. Kinect v2 for mobile robot navigation: evaluation and modeling[C]//2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR),Istanbul, 2015, 388-394.
- [23] 王维,李焱.基于 RRT 的虚拟人双臂操控规划方法[J].系统仿真学报,2009,21(20):6515-6518.
WANG Wei, LI Yan. RRT-based manipulation planning method for both arms of virtual human[J]. Journal of System Simulation, 2009,21(20):6515-6518. (in Chinese)
- [24] 王毅,张哲,马冀桐,等.采摘机器人奇异位型分析[J].机械传动,2019,43(1):124-130.
WANG Yi,ZHANG Zhe, MA Jitong,et al. Singularity analysis of harvesting robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019,43(1):124-130. (in Chinese)