doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.031

水平摘锭采棉理论分析与试验

李　腾[1]　郝付平[2]　韩增德[3]　方宪法[3]　韩科立[2]　李晓栋[2]

(1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 现代农装科技股份有限公司，北京 100083；
3. 中国农业机械化科学研究院，北京 100083)

摘要：采棉机作业效率主要与采棉头的滚筒转速、座管列数和摘锭转速等参数有关，且滚筒与摘锭的转速比为固定值。本文选择摘锭转速为研究对象，从摘锭顺利摘取棉花、绕尽单个棉瓣、棉籽甩离损失 3 方面进行理论分析，得到满足采棉要求的转速理论条件。根据已知摘锭参数及棉花力学特性等，计算出摘锭转速为 3 000 ~ 4 000 r/min。为了验证理论分析得出的摘锭转速范围，搭建单摘锭室内试验装置，以单朵棉花的采净率、采摘时间、功率消耗和棉籽甩离率为评价指标，分为 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000 r/min 6 个试验水平进行转速单因素试验。根据试验结果，建立多指标优化数学模型，在摘锭接近籽棉速度约为 0.2 m/s、棉籽甩离率不大于 2.5%、采净率不小于 90% 的条件下，摘锭转速范围为 3 600 ~ 3 700 r/min，与理论分析结果相吻合，满足棉花采摘要求。

关键词：水平摘锭；采棉头；摘锭转速；理论分析

中图分类号：S225.91^{+}1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)S0-0233-06

Theoretical Analysis and Experiment of Picking Cotton with Horizontal Spindle

LI Teng[1]　HAO Fuping[2]　HAN Zengde[3]　FANG Xianfa[3]　HAN Keli[2]　LI Xiaodong[2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Modern Agricultural Equipment Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The operating efficiency of cotton picker is mainly related to the parameters such as the drum speed of cotton picking head, number of seat pipes and spindle picking speed and speed ratio between drum and spindle is fixed. Horizontal spindle is the core working part of spindle-type cotton picker, and cotton picking is realized by winding cotton wadding at high speed. The spindle picking speed is key factor affecting effect of cotton picking. The spindle picking speed was theoretically analyzed from three aspects which were picking cotton smoothly, winding up a single cotton petal, and the loss of cotton seed throwing away. According to known picking parameters and mechanical properties of cotton, the speed range of picking spindle was estimated to be 3 000 ~ 4 000 r/min. In order to verify the range of spindle picking speed obtained by theoretical analysis, a single spindle picking laboratory test device was set up. The single factor test of spindle picking speed was carried out with the indexes of single cotton picking rate, picking time, power consumption and cottonseed rejection rate, which were divided into 1 000 r/min, 2 000 r/min, 3 000 r/min, 4 000 r/min, 5 000 r/min and 6 000 r/min test levels. According to the test results, a multi-index optimization mathematical model was established. Under the conditions of approaching seed cotton speed of 0.2 m/s, cotton seed rejection rate (no more than 2.5%) and cotton seed recovery rate (greater than or equal to 90%), the range of spindle picking speed was 3 600 ~ 3 700 r/min, which was consistent with the theoretical analysis and met the requirement of picking summary.

Key words: horizontal spindle; cotton picker; spindle speed; theoretical analysis

收稿日期：2018 - 07 - 10　修回日期：2018 - 08 - 25

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领域技术研究，E-mail：fangxf@caams.org.cn

0 引言

棉花是我国重要的经济作物和战略物资,随着人工采棉成本的增加,机械化采棉得到较快发展。棉花有统收式和采摘式两种收获方式,目前国内以水平摘锭采摘棉花为主[1-4]。

水平摘锭式采棉头由前后 2 个采棉滚筒组成,有同侧“一字”布置和左右交错布置两种型式,每个采棉滚筒在圆周方向均布 12 或 16 组座管,单组座管上下布置 18 或 20 个摘锭。水平摘锭作为采棉头的核心工作部件,通过高速旋转缠绕棉絮,实现棉花采摘,摘锭转速是影响采棉效果的关键因素。采棉机作业效率主要与采棉头的滚筒转速、座管列数和摘锭转速等参数有关[5-9],且滚筒与摘锭的转速比为固定值。

近些年来,国内相关学者对水平摘锭进行了一些研究[10-15]。如张智明[10]对摘锭转速在 4 500、5 000、5 500 r/min 时的采摘力进行了室内试验研究;崔强[11]运用 ANSYS 软件对摘锭进行了模态分析,提出了摘锭可能发生共振现象的转速范围;阎金刚等[12]研究了摘锭转速和全开棉花采净率的关系,得出棉花进给速度 1.6 m/s、转速 4 000 ~ 4 500 r/min 时,采净率达到最高。但未见基于单朵棉花采净率、采摘时间、功率消耗和棉籽甩离率的多指标优化数学模型进行摘锭转速研究的相关文献。

本文选择摘锭转速为研究对象,分析满足采棉要求的转速范围。从摘锭顺利摘取棉花、绕尽单个棉瓣、棉籽甩离损失 3 个方面进行理论分析,得到满足采棉要求的摘锭转速理论条件,计算出摘锭转速范围,并进行试验验证。

1 摘锭采棉理论分析

如图 1 所示,摘锭端部为锥齿轮,中间为圆柱,顶部为圆锥形状并有 3 排勾齿,勾齿具有法向倾斜角,表面镀铬。工作时与吐絮籽棉接触,通过勾齿勾取棉絮,快速卷绕,将棉絮采净,再通过反向旋转的脱棉盘将摘锭卷绕的棉絮脱下[16]。

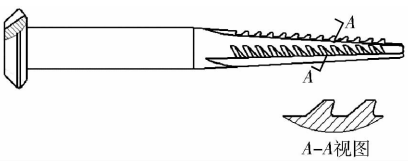

图 1 摘锭结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of spindle

1.1 摘锭顺利摘取棉花条件分析

摘锭的卷绕力需大于籽棉脱离棉铃壳所需的力,而小于棉絮断裂的力。卷绕力是勾结力和摩擦力的合成,为了方便研究,在摘锭齿部横断面处,取缠在摘锭上的微量长度棉纤维,摘锭半径为 r。微量长度为 dl 的棉纤维受力情况如图 2 所示。

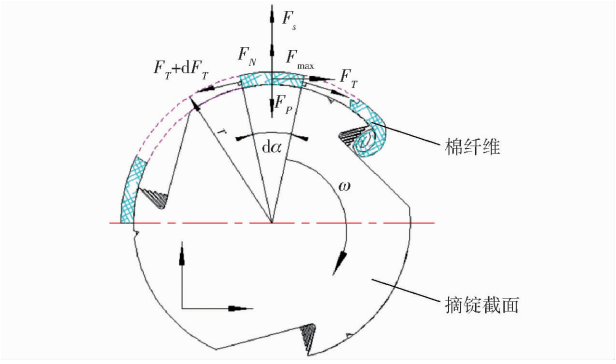

图 2 摘锭卷棉花纤维的受力分析

Fig. 2 Stress analysis of cotton fiber from spindle

当卷绕力等于摩擦力时,力学平衡方程[17]为

$$\begin{cases} F_N + F_s - \int F_P dl - (F_T + dF_T)\sin\dfrac{d\alpha}{2} - F_T\sin\dfrac{d\alpha}{2} = 0 \\ (F_T + dF_T)\cos\dfrac{d\alpha}{2} - F_T\cos\dfrac{d\alpha}{2} - dF_{max} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中 $F_s = m\omega^2 r dl$

式中 m——单位长度棉纤维的质量,kg/m

F_s——长度为 dl 的棉纤维所受的离心力,N

F_N——长度为 dl 棉纤维所受的压力,N

F_P——单位长度棉纤维所受外部压力,N/m

F_T——极限情况下棉纤维右侧断面所受张力,N

$F_T + dF_T$——极限情况棉纤维左侧断面受到的张力,N

F_{max}——长度为 dl 的棉纤维在卷绕过程中与摘锭间最大摩擦力,N

ω——摘锭在采棉区域内的绝对角速度,rad/s

$d\alpha$——微量棉纤维摘锭上的包角,rad

由于 $d\alpha$ 很小,可令 $\sin\dfrac{d\alpha}{2} = \dfrac{d\alpha}{2}$, $\cos\dfrac{d\alpha}{2} = 1$, $dF_T\sin\dfrac{d\alpha}{2} = dF_T\dfrac{d\alpha}{2}$,二元二次微分项可以略去不计,$dl = r d\alpha$,而且摩擦力与压力成正比,令 $F_{max} = \mu F_N$,代入式(1)得

$$\begin{cases} dF_N = F_P dl + F_T d\alpha - m\omega^2 r \\ dF_{max} = dF_T \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)得到一阶线性微分方程为

$$\frac{dF_T}{d\alpha} - \mu F_T = \mu r(F_P - m\omega^2 r) \tag{3}$$

式中 μ——棉纤维和摘锭表面的摩擦因数

由式(3)得到

$$F_T = e^{\mu\alpha}\left[C - \frac{r(F_P - m\omega^2 r)}{\mu e^{\mu\alpha}}\right] \tag{4}$$

式中　C——常数

因摘锭表面有齿，初始勾取力是 T_0，则 $\alpha = 0$ 时，$F_T = T_0$，得

$$C = T_0 + \frac{r(F_P - m\omega^2 r)}{\mu} \tag{5}$$

$$F_T = T_0 e^{\mu\alpha} + r(F_P - m\omega^2 r)(e^{\mu\alpha} - 1)/\mu \tag{6}$$

籽棉脱离棉铃壳所需的力为 T_1，棉花纤维断裂的临界拉力为 T_2，采棉顺利进行的条件为 $T_1 < F_T < T_2$，从而得出角速度 ω 的取值范围为

$$\sqrt{\frac{F_P}{mr} - \frac{\mu(T_2 - T_0 e^{\mu\alpha})}{mr^2(e^{\mu\alpha} - 1)}} < \omega < \sqrt{\frac{F_P}{mr} - \frac{\mu(T_1 - T_0 e^{\mu\alpha})}{mr^2(e^{\mu\alpha} - 1)}} \tag{7}$$

1.2　绕尽单个棉瓣条件分析

棉花在采棉头内的停留时间有限，必须在较短时间内将籽棉卷绕干净。摘锭在卷绕棉瓣时，会有两种情形，当棉瓣沿摘锭轴线方向的位移为零时，棉瓣同心缠绕在摘锭上，反之，则棉瓣呈螺旋状缠绕，实际工作时两种情况会叠加产生，为方便研究，分别分析。

当摘锭绕尽一个棉瓣，且为同心重叠缠绕时，结果如图 3 所示。当未缠上被拉扯的长度 L_1 为零时，缠绕一瓣棉花所需时间为

$$t_1 = \frac{n}{\omega} \approx \frac{L_\partial(1 + \varepsilon)}{\omega\pi(2r + b_1)} \tag{8}$$

式中　t_1——缠绕一瓣棉花所需时间，s

n——绕尽单瓣棉花所需摘锭转数

L_∂——棉条原长度，mm

ε——采摘过程中棉瓣的总伸长率，%

r——摘锭的截面半径，mm

b_1——棉条厚度，mm

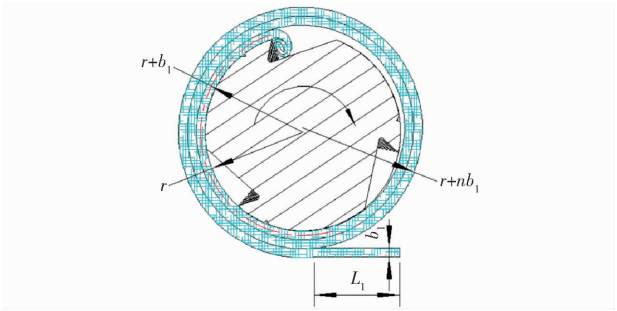

图 3　棉条重叠式绕在摘锭上的情况

Fig. 3　Overlapping of cotton strips on spindle

如图 4 所示，当棉条螺旋式绕在摘锭上时，可以认为棉条宽度中心线近似为阿基米德螺线，螺线的弧长就是摘锭缠绕棉条的长度。

$$L \approx n\sqrt{[\pi(2r + b_1)]^2 + b_2^2} \tag{9}$$

式中　L——螺旋式缠绕棉条长度，mm

b_2——螺旋式缠绕棉条间距，mm

缠绕一瓣棉花所需时间 t_2 为

$$t_2 = \frac{L_\partial(1 + \varepsilon)}{\omega\sqrt{[\pi(2r + b_1)]^2 + b_2^2}} \tag{10}$$

假设采棉机在采摘时，棉花与摘锭的接触时间允许最大值为 t_0，则 $t_1 \leqslant t_0$，$t_2 \leqslant t_0$，则角速度 ω 的范围为

$$\begin{cases} \omega > \dfrac{L_\partial(1 + \varepsilon)}{t_0\pi(2r + b)} \\ \omega > \dfrac{L_\partial(1 + \varepsilon)}{t_0\sqrt{[\pi(2r + b_1)]^2 + b_2^2}} \end{cases} \tag{11}$$

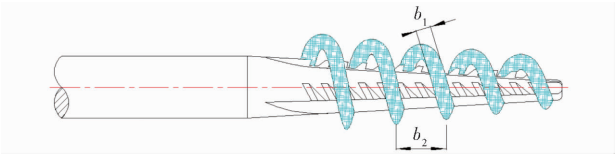

图 4　棉条螺旋式绕在摘锭上的情况

Fig. 4　Cotton fiber spiral wound on spindle

1.3　棉籽甩离条件分析

摘锭高速旋转采棉时，棉籽受离心力作用，容易发生甩离，造成落地棉损失。摘锭卷绕棉花时，棉籽受力如图 5 所示，则在随摘锭匀速转动时所需离心力 F_1 为

$$F_1 = m_1\omega^2 r \tag{12}$$

m_1 是棉籽质量，棉籽的重力是 G，当离心力大于棉籽重力和棉纤维断裂临界拉力 T_2 时，棉籽连同周围棉纤维一同甩离，甩离条件为 $F_1 > (T_2 - G)$，由此知不产生棉籽甩离的角速度范围为

$$\omega \leqslant \sqrt{\frac{T_2 - G}{m_1 r}} \tag{13}$$

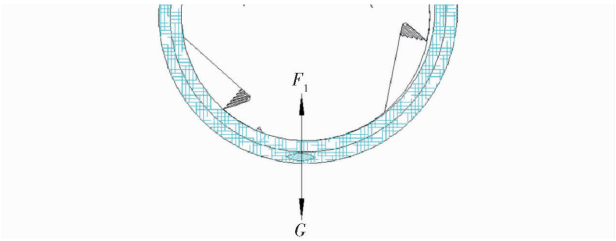

图 5　籽棉甩离情况分析

Fig. 5　Analysis of fling of seed cotton

通过理论分析，得到角速度 ω 的取值范围。查阅现有资料[18-22]，对式(7)、(11)、(13)中的参数进行确定：初始卷绕力 T_0 为 0.05 N，脱离棉铃壳所需的力 T_1 为 0.3 N，棉花纤维断裂的临界拉力 T_2 为 2 N，摘锭初始包角 α 为 4 rad，棉纤维和摘锭表面摩擦因数 μ 为 0.6，半径 r 为 3 mm，F_N 为 0.2 N，单位长度棉纤维的质量 m 为 2.7×10^{-5} kg/mm，棉瓣原

长度 L_0 为 50 mm,棉瓣伸长率 ε 为 120%,棉籽单粒质量为 0.2 g,棉花与摘锭的接触时间允许的最大值 t_0 为 0.5 s。数值代入式(11)、(13)得摘锭转速范围为3 000 ~ 4 000 r/min。

2 转速试验

2.1 试验目的与条件

基于上述理论分析得出的摘锭转速范围,搭建单摘锭的室内试验装置,进行单摘锭采棉,验证并获取摘锭的作业速度范围。

试验棉花的品种为陆地棉 14 - 2,属于机采棉品种,产自天津市宁河区的清河农场第九分厂。采摘时间是 2017 年 11 月,处于成熟期,要求吐絮程度一致,棉桃直径范围 58 ~ 60 mm,每朵棉瓣数量为 4 个,共 120 朵。从棉株上剪下吐絮棉,装入自封袋中,保持水分和避免棉花受挤压。田间采摘后 12 h 内进行室内试验。

从采摘的棉桃中随机选取 30 朵,测得每朵籽棉平均质量为 5.39 g。采用热风烘干法测量含水率(烘干机型号为 DHG - 9240A),测得平均含水率为 7.9%。

试验所用摘锭结构参数为 3 排勾齿,勾齿法向倾斜角为 15°,中部直径为 12.4 mm,总长 120.6 mm,中部长 50.5 mm,圆锥锥度为 6.4°,表面镀铬。为试验方便安装,将摘锭底部锥齿轮整体切除。试验时摘锭转速范围取 1 000 ~ 6 000 r/min,涵盖了上述理论分析转速范围。摘锭接近籽棉时的速度为 0.2 m/s 左右(实际作业时,摘锭随滚筒公转的线速度与前进速度的数值接近但方向相反,故摘锭与棉花接近的相对速度较小),接近方向为摘锭的水平径向。

2.2 试验方案

试验时,摘锭转速为单因素,摘锭转速分为 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000 r/min 6 个水平。同一转速下,重复采摘 10 朵棉花,共试验 60 次。

搭建的单摘锭采摘试验装置如图 6 所示。调速电机驱动摘锭转动,利用数据采集模块收集转速和功率信息,利用高速摄像机拍摄摘锭采摘过程。电机额定功率 100 W,最高转速 10 000 r/min,高速摄像机型号为 Fastec TS3,拍摄速率为 1 000 f/s,电压采集频率和电流采集频率同步为 50 Hz,转速传感器型号为 XYK - S01 - M12 - 3PF,响应频率 0 ~ 15 Hz。数据采集模块为 STM32 单片机,使用 STC - ISP 软件接收存储数据。

2.3 试验指标

根据国家标准 GB/T 21397—2008《棉花收获机》进行试验与评价,采棉机的采净率是一个重要指标,采净率不小于 90% 才满足作业要求;从高速摄像机拍摄的采摘过程可看到转速较高时,会出现带有棉花纤维的棉籽甩出现象(图 7),与前述理论分析一致,也是采棉机作业过程产生落地棉损失的一个重要因素。因此选取单朵棉花采净率 Z_1、单朵采摘时间 Z_2、功率消耗 Z_3 和棉籽甩离率 Z_4 为试验评价指标,其计算公式为

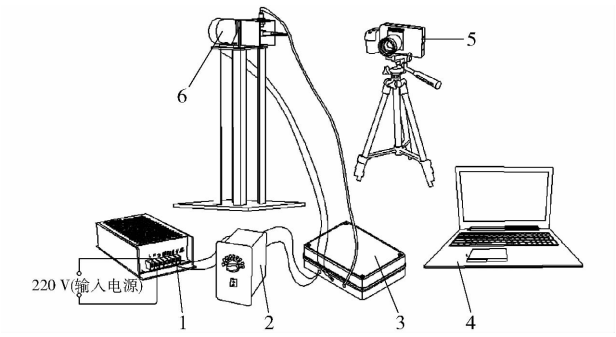

图 6 单摘锭采摘试验装置

Fig. 6 Single spindle speed test device

1. 变压器 2. 调速器 3. 数据采集模块 4. 计算机 5. 高速摄像机 6. 摘锭工作台

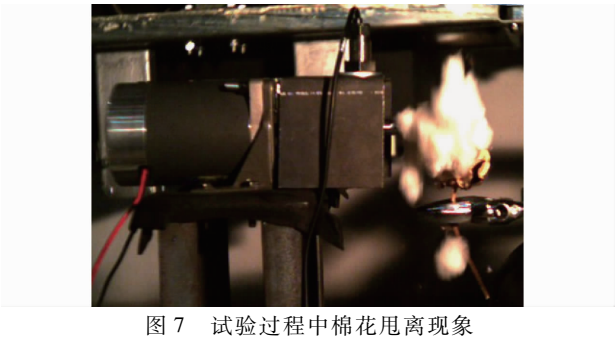

图 7 试验过程中棉花甩离现象

Fig. 7 Phenomenon of cotton shedding in process of experiment

$$Z_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \times 100\% \tag{14}$$

式中 M_1——采摘下的棉花质量,kg

M_2——采摘残留的棉花质量,kg

$$Z_2 = Q_2 - Q_1 \tag{15}$$

式中 Q_1——棉花纤维开始接触摘锭的时刻

Q_2——整朵棉花与棉铃彻底分离或棉絮断裂时刻

$$Z_3 = U_2 I_2 - U_1 I_1 \tag{16}$$

式中 U_1——电机空转的平均电压,V

U_2——采摘过程电机平均电压,V

I_1——电机空转的平均电流,A

I_2——采摘过程电机平均电流,A

$$Z_4 = \frac{M_3}{M} \times 100\% \tag{17}$$

式中 M_3——甩离掉的带有棉花纤维的棉籽质量,kg

M——每朵棉花的总质量，kg

3　试验结果与分析

3.1　试验结果

单摘锭采摘试验结果如表 1 所示，同一转速下，重复试验 10 朵棉花取平均值。

表 1　试验结果

Tab. 1　Test results

x/(r·min^{-1})	Z_1/%	Z_2/s	Z_3/W	Z_4/%
1 000	76.4	0.620	1.57	0.23
2 000	83.7	0.304	3.77	0.50
3 000	90.6	0.220	4.94	1.21
4 000	93.5	0.176	6.26	3.32
5 000	91.2	0.156	7.57	6.35
6 000	86.7	0.112	11.89	13.02

由表 1 可以看出，随转速增加，采净率先升高后减小，消耗的功率和籽棉甩离率逐渐增大，采摘时间呈下降趋势。

3.2　结果分析

图 8 ~ 11 为 4 个试验评价指标与转速的关系图。从图中可以看出：采净率随着转速的增加，逐步增加，达到最大值后开始下降。原因是转速增加到一定值，卷绕力大于棉纤维间的联结力，容易扯断，采摘残留增加，这与前述关于顺利摘取棉花的条件分析是一致的。采摘时间随着摘锭转速提高而变短，但转速越高下降趋势越慢。摘锭卷绕棉絮过程所用功率随着摘锭转速变大而增加，变化幅度也随转速增加而增大。棉籽在转速较低情况下，甩离较少，随着转速增加，籽棉甩离急剧增加，这与前述关于棉籽甩离分析是一致的。

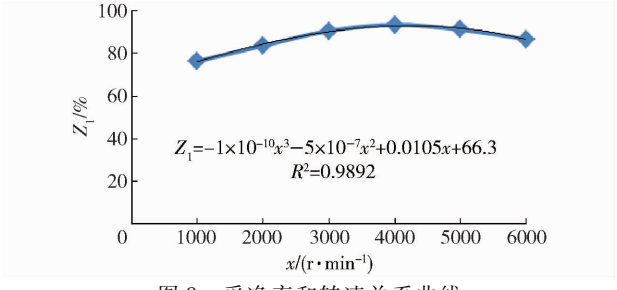

图 8　采净率和转速关系曲线

Fig. 8　Relationship between rate of picked cotton and rotation speed

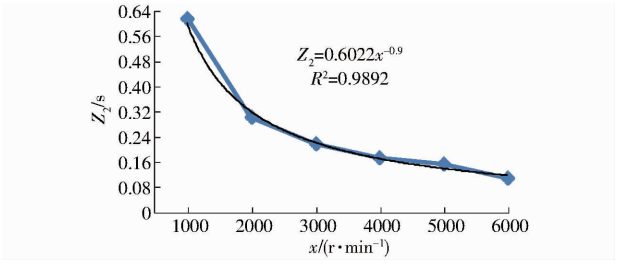

图 9　采摘时间和转速关系曲线

Fig. 9　Relationship between picking time and rotation speed

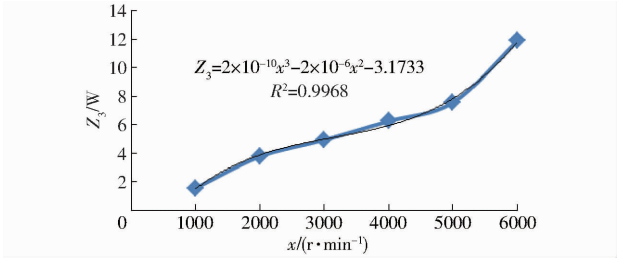

图 10　消耗功率和转速关系曲线

Fig. 10　Relationship between picking power and rotation speed

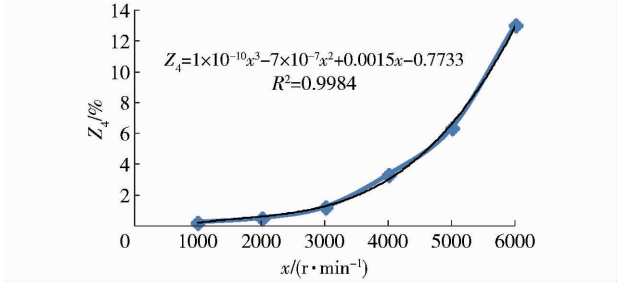

图 11　棉籽甩离率和转速关系曲线

Fig. 11　Relationship between rejection rate and rotation speed

3.3　建立多指标优化数学模型

图 8 ~ 11 的 4 条离散点曲线通过拟合，决定系数 R^2 都接近于 1，说明拟合的可信度较高，得到拟合曲线方程组为

$$\begin{cases} Z_1 = -1\times10^{-10}x^3 - 5\times10^{-7}x^2 + 0.0105x + 66.3 \\ Z_2 = 0.6022x^{-0.9} \\ Z_3 = 2\times10^{-10}x^3 - 2\times10^{-6}x^2 - 3.1733 \\ Z_4 = 1\times10^{-10}x^3 - 7\times10^{-7}x^2 + 0.0015x - 0.7733 \end{cases} \tag{18}$$

根据试验评价指标重要程度不同，采用权重法，单朵棉花采净率 Z_1、单朵采摘时间 Z_2、功率消耗 Z_3 和棉籽甩离率 Z_4 的权重分别取 0.45、0.1、0.1 和 0.35，同时根据国家标准 GBT 21397—2008《棉花收获机》中关于采棉机撞落棉率不大于 2.5% 和采净率不小于 90% 的规定得到限制条件，数学模型如下：

目标函数

$$\min F(x) = -0.45Z_1 + 0.1Z_2 + 0.1Z_3 + 0.35Z_4 \tag{19}$$

限制条件

$$\text{s.t.}\begin{cases} Z_1 \geqslant 90\% \\ Z_4 \leqslant 2.5\% \\ 1\,000\ \text{r/min} \leqslant x \leqslant 6\,000\ \text{r/min} \end{cases} \tag{20}$$

利用 Matlab 数学软件求解，考虑到误差的影响，目标函数取最小值时，摘锭转速合理的取值范围

为 3 600 ~ 3 700 r/min,与理论分析范围 3 000 ~ 4 000 r/min 相吻合。

4 结束语

通过对水平摘锭顺利摘取棉花条件、绕尽单个棉瓣条件、棉籽甩离损失条件的理论分析,得到摘锭转速范围为 3 000 ~ 4 000 r/min。通过单摘锭采摘试验,分析试验结果,建立多指标优化数学模型,求解得到摘锭转速范围为 3 600 ~ 3 700 r/min,满足棉花采摘要求。

参 考 文 献

1 周海燕, 孙玉峰, 杨炳南,等. 我国棉花收获机械应用现状及展望[J]. 农业工程, 2015, 5(3):16 - 18.
ZHOU Haiyan, SUN Yufeng, YANG Bingnan, et al. Application status and prospects of cotton harvester in China[J]. Agricultural Engineering, 2015,5(3):16 - 18. (in Chinese)

2 郝付平, 韩增德, 韩科立,等. 国内外采棉机现状研究与发展对策[J]. 农业机械, 2013(21):144 - 147.

3 高爱弟, 郭健, 高治国,等. 国产 4MZ - 5 型自走式采棉机改进[J]. 新疆农机化, 2015(4):29 - 31.

4 刘德.3 类国产品牌或将逆袭国际大牌[J].农业机械,2018(1):55 - 57.

5 毕新胜, 王维新, 丛锦玲,等. 水平摘锭式采棉机采棉滚筒的运动学分析[J]. 农机化研究, 2008,30(8):49 - 51.
BI Xinsheng, WANG Weixin, CONG Jinling, et al. Kinematics analysis of level spindle-type cotton picker drum[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(8):49 - 51. (in Chinese)

6 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上下)[M]. 北京:农业科技出版社, 2007.

7 洪荣荣. 基于轨迹及形态变异的大型采棉机械采摘机理研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015.
HONG Rongrong. The research of large cotton-picking machine picking mechanism based on the trajectory and the morphological variation[D]. Urumqi :Xinjiang University,2015. (in Chinese)

8 李小利. 水平摘锭式采棉机采摘机理及摘锭运动规律的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2011.
LI Xiaoli. Research on picking mechanism and spindle motion law for spindle-type cotton picker[D]. Urumqi : Xinjiang University, 2011. (in Chinese)

9 龚睫凯, 孙文磊, 李小利. 采棉机采摘滚筒运动规律的研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(6):38 - 42.
GONG Jiekai, SUN Wenlei, LI Xiaoli. Research law of motion in the pick roller of cotton picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(6):38 - 42. (in Chinese)

10 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.

11 崔强. 水平摘锭式采棉滚筒的关键部件研究[D]. 淄博:山东理工大学,2014.

12 阎金刚, 张宏文, 李福海,等. 基于 LabVIEW 的采棉机单摘锭试验台设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3):155 - 158.
YAN Jingang, ZHANG Hongwen, LI Fuhai,et al. Design of the single-spindle test-bed for the cotton picker based on LabVIEW [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(3):155 - 158. (in Chinese)

13 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.
LI Fuhai, ZHANG Hongwen, LI Yong, et al. Transient dynamic analysis for cam mechanism of the spindle-picking cotton[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(4):128 - 130. (in Chinese)

14 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)

15 张有强,罗树丽,张宏.间歇激励下摘锭采摘过程的动力学分析[J].噪声与振动控制,2017,37(6):41 - 45,157.

16 杨涛, 张宏文, 李勇,等. 滚筒式采棉机采摘头试验台的设计[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(6):772 - 775.
YANG Tao, ZHANG Hongwen, LI Yong, et al. Design of test-bed on roller-type cotton harvester[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2011,29(6):772 - 775. (in Chinese)

17 镇江农业机械学院. 农业机械理论及设计(下册)(经济作物收获机械及畜牧机械)[M]. 北京:中国工业出版社, 1961.

18 LI Teng, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. The study on friction test between cotton fiber, cotton , cotton seed and steel surface[C]//2017 ASABE Annual International Meeting,2017.

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 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(1):361 - 363.

21 邓亚猛,李文春,俞天柱,等.水平摘锭式采棉机的摘锭磨损因素分析与研究[J].中国农机化学报,2017,38(9):11 - 13.

22 张有强,王伟,廖结安.采棉机摘锭磨损失效分析[J].农业工程学报,2017,33(18):45 - 50.
ZHANG Youqiang, WANG Wei, LIAO Jiean. Wear failure analysis on spindle of cotton picker[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18):45 - 50. (in Chinese)