

变间距梳刷式枸杞采收装置优化设计与试验

张文强 李召召 谭豫之 李伟

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为实现枸杞机械化采收,提高枸杞采摘的采净率、降低损伤率,提出一种在沟槽凸轮的引导下,压板迫使骨架侧向张开,进而调节梳刷指间距的设计方案。通过对枸杞自然特征和物理参数测量分析,建立了梳刷指变间距控制部件的数学模型,并利用 Matlab 对其关键零件进行结构设计优化。以宁杞 1 号为研究对象,设计多参数变量的正交试验,以采净率和损伤率作为评价指标,得到对采摘效果影响程度由大到小的梳刷指参数依次为弹簧钢长度、指间距、弹簧钢直径;最佳的梳刷指参数组合为:指间距为 8 mm、弹簧钢长度为 45 mm、弹簧钢直径为 1.1 mm。在宁夏农科院枸杞研究所进行实地采收试验,结果表明:采净率为 90%,损伤率为 8.41%,满足枸杞采收的工作要求。

关键词: 枸杞; 采摘装置; 梳刷式; 结构优化; 正交试验

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0083-08

Optimal Design and Experiment on Variable Pacing Combing Brush Picking Device for *Lycium barbarum*

ZHANG Wenqiang LI Zhaozhao TAN Yuzhi LI Wei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The *L. barbarum* is a kind of infinite inflorescence berry plants, which means it must be picked once about every 7 d and need to be harvested 12 times a year during its growing season. At present, the artificial picking *L. barbarum* has the disadvantages of low efficiency and high labor intensity. With the market demand of *L. barbarum* growing increasingly year by year, its planting acreage is expanding quickly, a great deal with fruit pickers are demanded. However, the number of people to be skilled at picking *L. barbarum* is less and less. Mechanization of *L. barbarum* picking device can improve production efficiency, save planting costs and promote the rapid development of *L. barbarum* industry, thus the realization of *L. barbarum* mechanical picking is necessary. The selective picking principle was based on different fruit diameters between the mature and immature fruit, relying on friction and impulse force between the finger and *L. barbarum* to pick off the mature fruit. The immature *L. barbarum*, flowers and leaves would pass through the gaps between two fingers. However, mature *L. barbarum* approximate ellipsoid flexible body, during the brushing process, *L. barbarum* was clamped between two fingers and could not free fall off, affecting the follow-up picking. Therefore, variable pacing controlling component was designed to solve this problem. Firstly, to obtain the most reasonable brush finger spacing at two different limit positions, a mathematical model of the structural parameters of the variable pacing controlling component was established, which was optimized by fmincon function in Matlab software, and provided reference for the design of other parts. Based on the natural and physical parameters of *L. barbarum*, the brush finger structure was designed. Its key component affected the harvesting effect. Its structural parameters included the length of the spring steel, the spacing of fingers and the diameter of the spring steel. The greatest impact on the picking effect was the motor speed, which was determined by single factor tests, and optimal range was under 30 r/min. The test was conducted at planting base of *L. barbarum* of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, by measuring the picking rate and the damage rate of the prototype under different structural parameters of the brush finger.

收稿日期: 2018-03-04 修回日期: 2018-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701501)

作者简介: 张文强(1984—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业机器人研究, E-mail: zhangwq@cau.edu.cn

通信作者: 谭豫之(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人和智能化农业装备研究, E-mail: yztan@cau.edu.cn

A theory reference was provided for design of combing brush device. The main parameter influencing the picking rate and damage rate of the picking finger was determined by orthogonal test method which included the length of the spring steel, the spacing of fingers and the diameter of the spring steel. And the optimal results showed that the best combination was $A_1B_2C_2$ group of which the spacing of fingers was 8 mm, the length of the spring steel was 45 mm, and the diameter of the spring steel was 1.1 mm. And the corresponding performance indexes were as follows: the picking rate reached 90%, yet the damage rate was only 8.41%. The results can provide a reference for the development of *L. barbarum* combing brush picking machines.

Key words: *L. barbarum*; picking machine; combing brush; structure optimization; orthogonal test

0 引言

目前,国内对枸杞采摘装置的研究很多,根据采摘原理分为:振动式、梳刷式、剪切式、气动式^[1-3],市场应用主要集中在前两种方式。自走式大型枸杞采摘装置采用振动的方式,很难采摘枝条内部,且出现打折枝条、振落花叶、果实收集差等问题,整体采收效果不理想,尚处于研制改进阶段^[4]。小型枸杞采摘装置更符合当前实际生产的需要,振动式枸杞采摘装置以 4ZGB-30 型便携式枸杞采摘机为主要代表^[5],激励枝条使果萼处产生的惯性力大于结合力而脱落^[5],此过程很容易打伤枝条和果实,对枸杞造成二次伤害,存在采收损伤率高、含杂率高、果实收集较难的问题。高怀智^[6]研制的枸杞采摘电动机械手采用仿人手形状梳刷枸杞,其结构复杂,设备可靠性差,成本较高。周兵等^[7]研制的模拟手枸杞采摘机利用柔性胶管环捋摘枸杞果实,在人工将枸杞枝条压入胶管环内的过程中,枸杞容易产生压伤,影响果实品质。国外对浆果类采摘装置的研究主要集中在蓝莓^[8-11],枸杞采摘仅见韩国 SO^[12]研制的振动式枸杞采摘机,但韩国的枸杞品种与国内不同,不适用于我国枸杞采收^[2]。

本文设计一种变间距梳刷式枸杞采摘装置,利用梳刷指与枸杞之间的摩擦力实现枸杞与枝条的脱离,利用梳刷指的间距周期性变化,实现枸杞与梳刷指分离。采用 Matlab 优化和正交试验对采摘装置的关键部件进行优化设计,为枸杞机械化采摘提供一种新型的末端执行方案。

1 整机结构和工作原理

1.1 整机结构

图 1 是枸杞采摘装置结构简图。枸杞采摘装置由梳刷指、变间距控制部件、定位导向件、外壳、连接法兰和电动机模块组成。其中梳刷指由骨架、弹簧钢、硅胶套组成,硅胶套外径为 5 mm,包裹在弹簧钢上,降低对枸杞的冲击,弹簧钢末端设计为圆弧状,可提高梳刷效果^[13];变间距控制部件包括主轴、压板、沟槽凸轮和骨架,压板相对骨架上下滑动,迫使骨架围绕主轴旋转和侧向转动;两个定位导向件分别安装在外壳和连接法兰的开口处,便于枸杞枝条喂入采摘机构;两个沟槽凸轮分别与外壳和连接法兰螺栓固定,凸轮从动轴与压板螺栓连接,可在沟槽凸轮内自由滚动。两排梳刷指均穿过压板上的方孔与主轴铰链连接。工作时,主轴将动力传递给骨架,驱动压板在沟槽凸轮内滚动,在沟槽凸轮的引导下,压板相对骨架上下滑动,进而迫使骨架侧向转动,达到调节梳刷指间距的目的。

板、沟槽凸轮和骨架,压板相对骨架上下滑动,迫使骨架围绕主轴旋转和侧向转动;两个定位导向件分别安装在外壳和连接法兰的开口处,便于枸杞枝条喂入采摘机构;两个沟槽凸轮分别与外壳和连接法兰螺栓固定,凸轮从动轴与压板螺栓连接,可在沟槽凸轮内自由滚动。两排梳刷指均穿过压板上的方孔与主轴铰链连接。工作时,主轴将动力传递给骨架,驱动压板在沟槽凸轮内滚动,在沟槽凸轮的引导下,压板相对骨架上下滑动,进而迫使骨架侧向转动,达到调节梳刷指间距的目的。

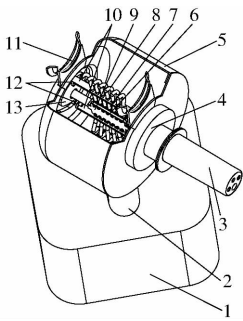


图 1 枸杞采摘装置结构简图

Fig. 1 Structure diagram of *Lycium barbarum* picking machine

- 1. 收集箱 2. 输送软管 3. 电动机模块 4. 连接法兰 5. 外壳
- 6. 铆钉 7. 骨架 8. 硅胶套 9. 主轴 10. 压板 11. 定位导向件 12. 凸轮从动轴承 13. 沟槽凸轮

1.2 工作原理与技术参数

枸杞属于无限花序类浆果,枝条上同时分布红果、青果、花、叶和少量的刺,要求采摘时只能采摘红果,不能损伤青果及花叶。红果按簇生长且呈下垂状,拎起枝条的末端,将枸杞采摘装置放于枝条下方,从枝条末端向内移动梳刷。红果与青果横径大小不同,枸杞采摘装置的指间距应大于最大的青果横径而小于最小的红果横径^[14-15],依靠梳刷指与枸杞之间的摩擦力和冲击力将枸杞捋下^[16],部分红果会卡在两指之间,无法掉落,青果、花和叶会从两指之间溜过^[17]。在变间距控制部件的作用下,夹持在两指之间的红果会在运行最下方时掉落。

为了验证梳刷式枸杞采摘方式的可行性,对枸杞的自然特性和物理特性进行了测量。本次测量的

枸杞品种为宁杞 1 号,如图 2 所示,随机选取 150 个红果样本和青果样本测量果实横径;分别随机选取 50 个枝条样本测量枝条粗端直径和细端直径、枸杞红果俯视宽度和枝叶俯视宽度、枝条长度和挂果段长度、枸杞与枝条侧向最大间距和最小间距;用数显式推拉力计(型号:HP-5,量程:0~5 N,精度:0.001 N)测量枸杞与果萼处的结合力和枸杞表面可承受的最大压力,测量结果如表 1 所示。



图 2 枸杞枝条
Fig. 2 *Lycium barbarum* branches

表 1 枸杞果实和枝条统计参数

参数	数值
红果横径/mm	6.58~12.92
红果纵径/mm	12.50~23.92
青果横径/mm	3.32~5.53
枸杞结合力/N	0.301~1.302
枸杞耐受压力/N	1.5
枝条粗端直径/mm	2.2~3.6
枝条细端直径/mm	1.1~2.1
枝条长度/mm	360~660
挂果段长度/mm	200~350
枸杞与枝条最大间距/mm	18.5~27.4
枸杞与枝条最小间距/mm	9.1~15.4
叶子俯视宽度/mm	50~86
红果俯视宽度/mm	30~40

由表 1 可知,枸杞枝条挂果集中且枝条柔软,拎起枝条末端,挂果段可视为一条直线。枸杞与枝条侧向间距是指果萼到枝条的距离,在自然状态下,果萼与枝条之间至少存在 9.1 mm 的距离;枸杞的俯视宽度为 30~40 mm,梳刷指有足够的空间梳入枝条内,保证梳刷指从枸杞果萼上方梳刷枸杞,而避免与枸杞直接撞击;红果与青果的横径相差较多,青果的最大横径小于红果最小横径,选择合适的梳刷指间距可有效地采摘红果而不误采青果,因此,梳刷采摘枸杞的方式可行。

2 主要工作部件设计

指间距为相邻梳刷指之间的间隙,是梳刷式枸杞采摘装置能够成功采摘枸杞而不损伤其他部分的关键,间距过小,会将青果、花叶误采,造成产量损

失,间距过大,红果从两指之间穿过,不能有效采摘枸杞。梳刷指末端间距取决于主轴上骨架安装孔的间距和在变间距控制部件的控制下梳刷指末端侧向张开的距离。变间距控制部件可以实现红果和梳刷指的分离,对其优化设计可使指间距尽可能一致,而调节指间距的关键是压板上方孔的位置参数。

图 3 是变间距控制部件结构图,位置 1 是压板处于沟槽凸轮远处停歇段中心时的情况,位置 2 是压板处于沟槽凸轮近处停歇段中心时的情况。以右侧 3 列梳刷指为分析对象,当压板相对骨架向上运动时,骨架与方孔右上角相切,迫使梳刷指向内转动,指间距减小;向下运动时,骨架与方孔左下角相切,迫使梳刷指向外转动,指间距变大;当压板在远程停歇段时,指间距最小,用于梳刷枸杞,此时梳刷指间距称为工作间距;当压板处于近程停歇段时,指间距最大,保证被摘下的红果掉落,此时指间距称为松开间距;如此往复运动,实现调节指间距的功能。

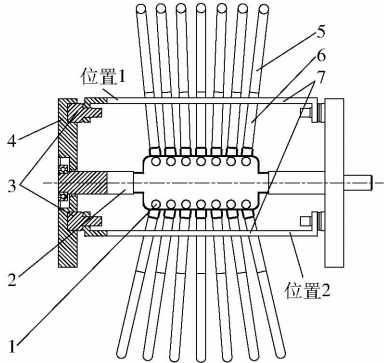


图 3 变间距控制部件结构图

Fig. 3 Structure diagram of pacing controlling component
1. 铆钉 2. 主轴 3. 凸轮从动轴承 4. 沟槽凸轮 5. 硅胶套
6. 骨架 7. 压板

图 4 是指间距控制过程示意图,梳刷指在不同位置时末端间距不同,对压板上孔的宽度要求和中心要求在不同位置时也不同,两者存在一定的差值,且越靠近两侧该差值越大。为了满足梳刷指在不同位置对指间距控制精度的要求,每组差值应越

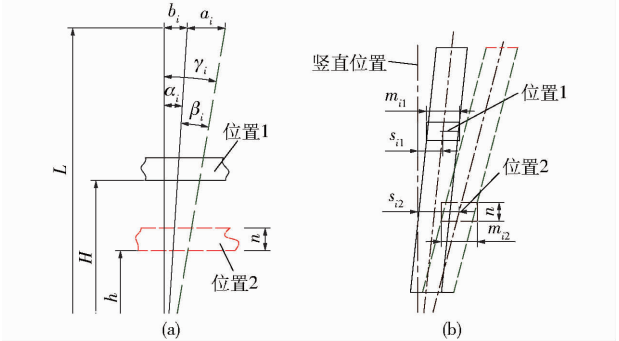


图 4 指间距控制过程示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of pacing controlling process

小越好,利用 Matlab 中非线性多元函数最小值函数对变间距控制部件进行优化,得到压板方孔设计参数,进而得到最佳控制精度。

2.1 数学建模

为了压板在相对骨架滑动时,梳刷指能够转动,中间梳刷指竖直布置,两侧的梳刷指关于中心倾斜布置。以中间梳刷指为参考,图 4a 表示右侧第 i 列梳刷指在不同位置的间距控制情况,图 4b 是在不同位置时压板方孔位置参数示意图。在位置 1 梳刷指倾斜布置时,梳刷指张开距离为 b_1 ,压板从位置 1 移动到位置 2 时,梳刷指张开增量为 a_1 。以此类推,第 i 个($i=1,2,3$,分别表示右侧第 1 列、第 2 列、第 3 列梳刷指)梳刷指张开距离为 b_i ,此时梳刷指与竖直方向的夹角为 α_i ,梳刷指张开增量为 a_i ,此时梳刷指与竖直方向的夹角为 γ_i 。

图 4b 中方孔的几何参数包括方孔宽度 m 和方孔中心与竖直位置的距离 s ,其决定了指间张开的距离。因此对不同位置时的压板方孔理论宽度 m_{i1} 、 m_{i2} 和方孔中心与竖直位置的理论距离 s_{i1} 、 s_{i2} 进行建模计算,即

$$\begin{cases} m_{i1} = \frac{D}{\cos\alpha_i} + n\tan\alpha_i \\ m_{i2} = \frac{D}{\cos\gamma_i} + n\tan\gamma_i \\ s_{i1} = \left(H + \frac{n}{2}\right)\tan\alpha_i \\ s_{i2} = \left(h + \frac{n}{2}\right)\tan\gamma_i \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\alpha_i = \arcsin \frac{b_i}{L}$$
$$\beta_i = \arcsin \frac{ia_i \cos\alpha_i}{L}$$
$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_i$$
$$a_i = ia$$
$$b_i = ib$$

式中 m_{i1} ——位置 1 压板方孔理论宽度,mm
 m_{i2} ——位置 2 压板方孔理论宽度,mm
 s_{i1} ——位置 1 方孔中心与竖直位置距离,mm
 s_{i2} ——位置 2 方孔中心与竖直位置距离,mm
 α_i ——位置 1 梳刷指与竖直位置的夹角,(°)
 β_i ——位置 2 梳刷指张开角度,(°)
 γ_i ——位置 2 梳刷指与竖直位置的夹角,(°)
 D ——骨架直径,mm
 n ——压板厚度,mm
 L ——梳刷指末端与安装孔的距离,mm
 H ——位置 1 压板与安装孔的距离,mm

h ——位置 2 压板与安装孔的距离,mm
 b ——位置 1 梳刷指张开距离,mm
 a ——位置 2 梳刷指张开增量,mm

2.2 确定设计变量

式(1)中的 D 为 5 mm、 n 为 3 mm。根据几何关系可知,梳刷指末端张开的距离取决于 b 、 a 、 L 、 H 、 h 。由此得到 5 维设计变量

$$\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (b, a, L, H, h)$$

2.3 确定约束条件

在位置 2 时梳刷指张开角度 γ_i 大于位置 1 的张开角度 α_i ,所以对 β_i 约束如下,得到 3 个非线性约束

$$\beta_i = \arcsin \frac{ia_i \cos\alpha_i}{L} \geq 0 \quad (2)$$

根据结构之间的制约关系和枸杞的自然特征得到 14 个边界约束

$$\begin{cases} 1 \leq b \leq 4 \Rightarrow \begin{cases} g_1(\boldsymbol{X}) = x_1 - 4 \leq 0 \\ g_2(\boldsymbol{X}) = 1 - x_1 \leq 0 \end{cases} \\ 3 \leq a \leq 5 \Rightarrow \begin{cases} g_3(\boldsymbol{X}) = x_2 - 5 \leq 0 \\ g_4(\boldsymbol{X}) = 3 - x_2 \leq 0 \end{cases} \\ 30 \leq L \leq 70 \Rightarrow \begin{cases} g_5(\boldsymbol{X}) = x_3 - 70 \leq 0 \\ g_6(\boldsymbol{X}) = 30 - x_3 \leq 0 \end{cases} \\ 20 \leq H \leq 30 \Rightarrow \begin{cases} g_7(\boldsymbol{X}) = x_4 - 30 \leq 0 \\ g_8(\boldsymbol{X}) = 20 - x_4 \leq 0 \end{cases} \\ 14 \leq h \leq 20 \Rightarrow \begin{cases} g_9(\boldsymbol{X}) = x_5 - 20 \leq 0 \\ g_{10}(\boldsymbol{X}) = 14 - x_5 \leq 0 \end{cases} \\ 40 \leq L - H \leq 60 \Rightarrow \begin{cases} g_{11}(\boldsymbol{X}) = x_3 - x_4 \leq 60 \\ g_{12}(\boldsymbol{X}) = x_4 - x_3 \leq -40 \end{cases} \\ 10 \leq H - h \leq 30 \Rightarrow \begin{cases} g_{13}(\boldsymbol{X}) = x_4 - x_5 \leq 30 \\ g_{14}(\boldsymbol{X}) = x_5 - x_4 \leq -10 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

2.4 建立目标函数

在不同位置时,压板方孔理论宽度 m_{i1} 、 m_{i2} 和方孔中心与安装孔的距离 s_{i1} 、 s_{i2} 均不相等,压板一旦加工完毕,则尺寸无法改变,为最大限度满足两个不同位置末端间距对压板方孔理论位置参数的要求,不同位置理论参数的误差应越小越好,由此建立的目标函数为

$$\min f(\boldsymbol{X}) = \sum_{i=1}^3 (p_i^2 + q_i^2) \quad (4)$$

其中

$$q_i = m_{i1} - m_{i2}$$
$$p_i = s_{i1} - s_{i2}$$

2.5 优化方法和计算结果分析

根据变量之间的边界约束条件,fmincon 函数的各个参数输入为^[18]

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0 = [2 \quad 4 \quad 50 \quad 25 \quad 15]^T \\ \mathbf{b} = [60 \quad -40 \quad 30 \quad -10] \\ \mathbf{l}_b = [1 \quad 3 \quad 30 \quad 20 \quad 14]^T \\ \mathbf{u}_b = [4 \quad 5 \quad 70 \quad 30 \quad 20]^T \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

式中 $\mathbf{l}_b$ ——变量下限 $\mathbf{u}_b$ ——变量上限
 $\mathbf{x}_0$ ——迭代初始值
 $\mathbf{A}$ ——线性不等式约束矩阵
 $\mathbf{b}$ ——线性不等式约束系数矩阵

经过 Matlab 编程迭代计算,得到最优解为
 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (2.606, 3, 70, 30, 14)$
目标函数 $f(\mathbf{X}) = 0.381\ 2$, exitflag 等于 1 表示迭代收敛,得到的最优解准确有效。梳刷指工作间距为位置 1 时梳刷指张开距离与主轴安装孔间距之和,根据优化结果,位置 1 时张开距离为 2.606 mm,为主轴安装孔间距的设计提供了依据。通过式(1)计算得到不同位置压板方孔理论位置参数,计算结果如表 2 所示。

表 2 压板方孔理论位置参数

Tab. 2 Theoretical position parameters of square hole on press plate

hole on press plate						mm
i	m_{i1}	m_{i2}	q_i	s_{i1}	s_{i2}	p_i
1	5.12	5.26	0.14	1.248	1.244	-0.004
2	5.24	5.55	0.31	2.501	2.503	0.002
3	5.37	5.88	0.50	3.765	3.794	0.029

由表 2 可知 q_i 远大于 p_i , 即在不同位置时,方孔理论宽度的差值远大于方孔中心与竖直位置理论距离的差值,因此,方孔的实际加工宽度选取两者之间的最大值,方孔中心与竖直位置的理论距离取平均值。

$$\begin{cases} m_i = \max\{m_{i1}, m_{i2}\} \\ s_i = (s_{i1} + s_{i2})/2 \end{cases} \quad (5)$$

整合出最终的压板方孔实际加工位置参数 m_1 、 m_2 、 m_3 和 s_1 、 s_2 、 s_3 。

3 试验

加工变间距梳刷式枸杞采摘装置进行现场试验,试验时间为 2017 年 7 月,针对 8 年树龄的宁杞 1 号设计正交试验,试验地点为宁夏农科院枸杞研究所。

3.1 试验设计

为提高梳刷指的柔韧性,梳刷指末端以弹簧钢

为支撑,包裹硅胶套。工作时,梳刷指末端与枸杞直接接触,两者之间的接触力是枸杞采摘成功的关键。而指间距、弹簧钢长度、弹簧钢直径以及梳刷指圆弧段半径共同决定梳刷指对枸杞的接触力。圆弧段半径越大,梳刷指振动越大,伸入到枸杞果柄处时会出现勾住枝条的情况,为保证枸杞处于圆弧段工作段,所以,圆弧段半径取值借鉴枸杞纵径尺寸,取值为 20 mm。所以,以指间距、弹簧钢长度、弹簧钢直径为试验因素,加入空白列估计随机误差^[19],采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法。

工作时,采摘机需要伸入错综复杂的枝干内,整机结构小巧紧凑方可满足使用要求,初定外壳半径为 100 mm。根据优化结果,压板与安装孔的最大距离 H 为 31 mm,当骨架侧向张开时,骨架末端相对中间骨架末端高度会降低,因此骨架末端与安装孔距离定为 35 mm,此时,骨架末端与主轴轴线距离为 48.5 mm,弹簧钢末端与骨架末端相距 51.5 mm。弹簧钢与骨架用 AB 胶黏结,其中孔深 10 mm,因此,弹簧钢长度最大为 61.5 mm。圆弧段半径取值借鉴枸杞纵径尺寸,取值为 20 mm,少数枸杞纵径大于 20 mm,因此骨架与圆弧段起始点距离为 10 mm,据此得到弹簧钢长度最小为 40 mm。由此,选择弹簧钢长度 45、55、65 mm 为正交试验的水平。

指间距为相邻梳刷指之间的间隙,是梳刷式枸杞采摘装置能够成功采摘枸杞而不损伤其他部分的关键。梳刷原理基于枸杞的自然特性,为不伤及青果、枝叶和花,同时有效梳刷枸杞,指间距应大于最大的青果横径尺寸、且小于最小的红果横径尺寸。红果横径尺寸范围为 6.58 ~ 12.92 mm,青果横径范围为 3.32 ~ 5.53 mm。考虑到弹簧钢的柔性,选取梳刷指间距 6、8、10 mm 作为正交试验的水平。

弹簧钢的直径也影响梳刷指与枸杞的接触力。初定梳刷指间距为 6 ~ 10 mm,为保证采摘效果,弹簧钢末端最大位移为 3.46 mm。枸杞的损伤极限值为 1.5 N,单个弹簧钢承受的压力最大为 0.75 N,由此进行 ANSYS 静力分析,得到不同长度、不同直径的弹簧钢末端位移,分析可知,弹簧钢长度在 45 ~ 65 mm、直径在 1.0 ~ 1.2 mm 时,弹簧钢末端最大位移为 4.179 mm,而且由于硅胶的缓冲作用,枸杞与梳刷指的作用力小于 0.75 N,因此选用弹簧钢直径为 1.0、1.1、1.2 mm 作为正交试验的水平。试验因素和水平如表 3 所示。

以采净率和破损率为试验指标^[4],得到 3 个因素对两个指标的影响规律和最优组合。转速是影响采收效果的主要因素,在指间距为 8 mm,弹簧钢长

表 3 试验因素与水平

Tab.3 Experimental factors and levels

水平	因素		
	弹簧钢长度	弹簧钢直径	指间距
	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm
1	45	1.0	6
2	55	1.1	8
3	65	1.2	10

度为 5.5 mm、直径为 1.1 mm 时,对转速进行预试验。试验表明,转速大于 50 r/min 时,枸杞破损率大于 30%,且转速过快导致红果不能及时排出,转速小于 30 r/min 时,损伤率低于 5%,因此,本次正交试验的转速定为 30 r/min。

采净率是指成功采摘的红果数占枝条上红果总数的百分比。统计采摘之前枝条上红果总数和成功采摘的红果总数,枸杞采净率计算公式为

$$w_c = \frac{S_c}{S_z} \times 100\%$$
 (6)

式中 w_c ——采净率,%
 S_c ——成功采摘的红果总数
 S_z ——枝条上的红果总数

损伤率是指成功采摘的枸杞中,受损枸杞所占的百分比。受损的枸杞晒干后会发黑,对成功采摘的红果进行撒碱、晾晒等晒干工艺,请当地种植枸杞的人员统计因在采摘过程中出现损伤而发黑的枸杞数目,损伤率计算公式为

$$w_s = \frac{S_s}{S_c} \times 100\%$$
 (7)

式中 w_s ——损伤率,%
 S_s ——受损红果总数

3.2 试验结果与分析

图 5 为田间采摘试验,得到试验结果如表 4 所示, A 、 B 、 C 为因素水平值。试验结果采用直观分析的方法,根据极差大小得到因素对采净率和损伤率影响的因素优水平、主次顺序及优化组合。梳刷指结构参数优化试验为多指标正交试验,为此采用综合评分法将两个指标的试验结果转换为单一综合指标,根据指标的重要性,设定采净率和损伤率的权重



图 5 田间采摘试验
Fig.5 Field picking test

表 4 正交试验方案与结果

Tab.4 Schemes and results of orthogonal experiment

试验号	空白	A	B	C	性能参数		
					采净率	损伤率	综合评分
					$w_c/\%$	$w_s/\%$	$z_p/\%$
1	1	2	2	3	74.83	6.25	80.5
2	2	3	1	3	68.14	7.22	75.5
3	2	2	3	1	85.94	17.21	85.0
4	1	1	1	1	88.18	16.67	86.7
5	3	3	2	1	87.93	18.28	84.9
6	3	1	3	3	83.84	6.52	86.7
7	2	1	2	2	90.00	8.41	90.5
8	1	3	3	2	82.54	15.63	83.1
9	3	2	1	2	81.13	9.52	83.9

为 0.7、0.3^[20]。为表示加权平均值越大,说明采摘效果越好,在计算加权平均值之前,对评分计算方式做变换

$$z_p = 0.7w_c + 0.3w_{sp}$$
 (8)

其中 $w_{sp} = 1 - w_s$
式中 w_{sp} ——损伤率评分值,%
 z_p ——综合评分值,%

采净率正交试验极差分析如表 5 所示,可以看出采净率的优化组合为 $A_1B_3C_1$,即指间距为 6 mm,弹簧钢长度为 45 mm、直径为 1.2 mm。影响采净率的主次因素为 C 、 A 、 B ,即指间距对采净率影响最大,弹簧钢长度次之。指间距越小,弹簧钢越短、直径越大,则采净率越高。得到这样结果的主要原因是摩擦力大于枸杞果萼处的结合力,导致枸杞掉落,指间距越小,弹簧钢越短、直径越大,梳刷指末端对枸杞的正压力越大,与枸杞之间的摩擦力越大,可增大采摘的可靠性。

表 5 采净率正交试验极差分析

Tab.5 Range analysis of picking ratio

参数	因素			
	空白	A	B	C
k_1	81.85	87.34	79.15	86.78
k_2	81.36	80.63	83.68	84.56
k_3	83.73	78.96	84.11	75.60
极差 R	2.37	8.38	4.95	11.17
优水平		A_1	B_3	C_1
主次因素		C 、 A 、 B		

损伤率正交试验极差分析如表 6 所示,通过数据分析可知损伤率的优化组合为 $A_1B_2C_3$,即指间距为 10 mm、弹簧钢长度为 45 mm、直径为 1.1 mm。影响采摘损伤率主次因素依次为 C 、 A 、 B ,梳刷指间距越大,弹簧钢越长,损伤率越低。统计损伤率时发现,损伤形式为破裂和压伤,极少部分发生明显破

裂。产生轻伤的主要原因为枸杞从摘下到松开,梳刷指对枸杞一直保持夹紧状态,机械加持容易使果实组织受损^[21]。弹簧钢越长对枸杞的夹紧力越小,但同样的转速下,弹簧钢越长,梳刷指末端对枸杞的冲击越大,易造成损伤,导致枸杞出现破裂,而指间距和弹簧钢直径通过决定加持时夹紧力大小来影响损伤率。

表 6 损伤率正交试验极差分析
Tab.6 Range analysis of damage ratio

参数	因素			
	空白	A	B	C
k_1	12. 85	10. 53	11. 14	17. 39
k_2	10. 95	11. 00	10. 98	11. 19
k_3	11. 44	13. 71	13. 12	6. 66
极差 R	1. 90	3. 17	2. 14	10. 72
优水平		A_1	B_2	C_3
主次因素		$C、A、B$		

综合加权评分分析如表 7 所示,可以看出 3 个因素对采摘效果影响程度由大到小的顺序为 A、C、

表 7 综合评分正交试验极差分析
Tab.7 Range analysis of comprehensive score

参数	因素			
	空白	A	B	C
k_1	83. 44	87. 98	82. 07	85. 53
k_2	83. 67	83. 14	85. 28	85. 83
k_3	85. 18	81. 16	84. 94	80. 92
极差 R	1. 73	6. 82	3. 22	4. 91
优水平		A_1	B_2	C_2
主次因素		$A、C、B$		

B,枸杞采摘效果最佳的组合方案为 $A_1B_2C_2$,即在指间距为 8 mm、弹簧钢长度为 45 mm、直径为 1. 1 mm 时,采摘效果最佳,此时采净率为 90%,损伤率为 8. 41%,表明选择合理的梳刷指参数能够获得较好的采摘效果。

4 结论

(1)根据枸杞红果与青果横径的不同,设计了一种变间距梳刷式枸杞采摘装置。该装置依靠梳刷指与枸杞之间的摩擦力将枸杞捋下,实现枸杞脱离枝条;进一步利用变间距控制部件达到调节梳刷指末端间距的目的,实现红果与梳刷指的分离。初步试验表明:梳刷式枸杞采摘装置能够完成枸杞的采摘作业。

(2)通过建立梳刷指变间距控制部件的数学模型,利用 Matlab 优化工具箱对其关键零件进行结构优化设计。根据优化结果,位置 1 时的张开距离为 2. 606 mm,再结合指间距为 8 mm,为主轴安装孔间距设计提供依据。优化后结构更加紧凑,指间距控制精度高,一致性好,提高了梳刷采摘的可靠性。

(3)通过梳刷指结构参数优化试验得到梳刷指参数对采净率与损伤率的影响规律:指间距越小,弹簧钢长度越短、直径越大,则采净率越高。梳刷指间距越大,弹簧钢长度越短、直径越小,损伤率越低;梳刷指结构参数对采摘效果影响由大到小依次为弹簧钢长度、指间距、弹簧钢直径;梳刷指的最佳组合参数为:指间距为 8 mm,弹簧钢长度为 45 mm、直径为 1. 1 mm。枸杞采摘试验结果表明:采净率为 90%,损伤率为 8. 41%。试验效果良好,满足生产要求。

参 考 文 献

1 何苗,李成松,王丽红,等. 枸杞采收装置的研究现状[J]. 安徽农业科学, 2015,43(33): 367–369.
HE Miao, LI Chengsong, WANG Lihong, et al. Research status of the harvesting device of *Lycium barbarum*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015,43(33): 367–369. (in Chinese)

2 石志刚,肖宏儒,万如,等. 枸杞采摘机研究进展[J]. 农业科技与装备, 2016(5): 53–56.
SHI Zhigang, XIAO Hongru, WAN Ru, et al. Research progress of Chinese wolfberry picking machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2016(5): 53–56. (in Chinese)

3 程敬春,郭辉,韩长杰,等. 枸杞机械采摘技术研究现状及发展趋势[J]. 农业科技与装备, 2012(3): 12–13.
CHENG Jingchun, GUO Hui, HAN Changjie, et al. Present situation and analysis of *Lycium barbarum* mechanical picking technology research in China[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(3): 12–13. (in Chinese)

4 张最,肖宏儒,丁文芹,等. 振动式枸杞采摘机理仿真分析与样机试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 20–28.
ZHANG Zui, XIAO Hongru, DING Wenqin, et al. Mechanism simulation analysis and prototype experiment of *Lycium barbarum* harvest by vibration mode[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 20–28. (in Chinese)

5 陈度,杜小强,王书茂,等. 振动式果品收获技术机理分析及研究进展[J]. 农业工程学报, 2011,27(8):195–200.
CHEN Du, DU Xiaoqiang, WANG Shumao, et al. Mechanism of vibratory fruit harvest and review of current advance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 195–200. (in Chinese)

6 高怀智. 机械采摘电动机械手: 201410498476. 2[P]. 2014–12–31.

7 周兵,何晶. 模拟手枸杞采摘机设计[J]. 农业工程学报, 2010,26(增刊 1): 13–17.
ZHOU Bing, HE Jing. Design of simulate hand *L. barbarum* picking machine[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(Supp. 1):

- 13-17. (in Chinese)
- 8 ERDOGAN D, GUNER M, DURSUN E, et al. Mechanical harvesting of apricots[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(1): 19-28.
- 9 MANN D D, PETKAU D S, CROWE T G, et al. Removal of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berries by shaking[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2001, 43(2): 23-28.
- 10 STRIK B. Blueberry production and research trends in North America[J]. Acta Horticulturae, 2006, 715: 173-184.
- 11 SARIG Y. Robotics of fruit harvesting, a state-of-the-art review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2003, 54(4): 265-280.
- 12 SO J D. Vibratory harvesting machine for boxthorn (*Lycium Chinese mill*) berries[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 211-221.
- 13 吕小荣, 吕小莲, 王庭钰, 等. 半喂入式花生摘果机虚拟仿真分析与试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 190-196.
- LÜ Xiaorong, LÜ Xiaolian, WANG Tingyu, et al. Virtual simulation and experimental research of half-feed peanut picker[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 190-196. (in Chinese)
- 14 姬长英, 张纯, 顾宝兴, 等. 梳割气吸一体式贡菊采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 137-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.017.
- Ji Changying, ZHANG Chun, GU Baoxing, et al. Design and experiment of shear-sucking mountain chrysanthemum picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 137-145. (in Chinese)
- 15 张智龙, 张东兴, 崔涛, 等. 玉米梳齿摘穗单体机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 1-9.
- ZHANG Zhilong, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design and experiment of corn stripping monomer mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 1-9. (in Chinese)
- 16 李超, 邢洁洁, 徐丽明, 等. 柔性梳脱式酿酒葡萄脱粒机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 290-296.
- LI Chao, XING Jiejie, XU Liming, et al. Design and experiment of wine grape threshing mechanism with flexible combing stripping monomer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 290-296. (in Chinese)
- 17 高自成, 李立君, 李昕, 等. 齿梳式油茶果采摘机采摘执行机构的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 19-25.
- GAO Zicheng, LI Lijun, LI Xin, et al. Development and test of picking actor in oil-tea camellia fruit picking machine of tooth comb type[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 19-25. (in Chinese)
- 18 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- 19 孙哲, 张春龙, 马瑶瑶, 等. 摆动式间苗机器人锄刀优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 70-75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170909&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.009.
- SUN Zhe, ZHANG Chunlong, MA Yaoyao, et al. Optimal design and experiment of thinning hoe for swing motion thinning robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 70-75. (in Chinese)
- 20 李长友, 马兴灶, 程红胜, 等. 荔枝定向去核剥壳机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 93-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140815&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.015.
- LI Changyou, MA Xingzao, CHENG Hongsheng, et al. Design and experiment of litchi denucleating and decorticating machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 93-100. (in Chinese)
- 21 刘继展, 白欣欣, 李萍萍, 等. 果实快速夹持复合碰撞模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 49-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.008.
- LIU Jizhan, BAI Xinxin, LI Pingping, et al. Complex collision model in high-speed gripping of fruit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 49-54. (in Chinese)