

融合光电色选的皮带筛式油茶果壳籽分选机设计与试验

鹿瑶^{1,2} 王伟^{1,2} 钟斌³ 金奇³ 王博^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 赣南医学院赣南油茶产业开发协同创新中心, 赣州 341000)

摘要: 针对油茶果批量脱壳后壳籽混杂、人力分选效率低的问题,研究设计了一种融合光电色选的皮带筛式油茶果壳籽分选机。根据油茶果壳、籽与倾斜传送带间摩擦角、碰撞系数的差异,设计振动皮带筛进行初分选;利用两者灰度差异,对壳中残留籽进行二次光电分选。对皮带筛上油茶果壳、籽进行运动学与动力学分析,发现皮带倾角、皮带速度和振动频率是影响振动初分选率的主要因素;以籽箱清洁率、壳中含籽率为试验指标,开展正交旋转组合试验。当皮带倾角为19°、皮带速度为1.50 m/s、振动频率为55.40 Hz时,其籽箱清洁率为95.52%、壳中含籽率为24.30%,对最优参数进行试验验证,优化结果可靠。对不同茶籽比率的物料进行光电分选试验,结果表明籽箱清洁率稳定在98.23%左右,壳中含籽率保持在2.34%左右,说明光电分选可准确识别并分选出混杂物料中的油茶籽。对整机进行最优参数试验验证,该机两籽箱茶籽平均清洁率可达97.55%,壳箱中含籽率为3.27%。试验结果表明,此油茶果壳籽分选机可实现油茶果壳、籽的高效分离。

关键词: 油茶果; 壳籽分选机; 光电色选; 振动皮带筛

中图分类号: S226.5; S375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0429-11

Design and Experiment of Belt Screen Seed Sorter for *Camellia oleifera*
Fused with Photoelectric Color Sorting Technology

LU Yao^{1,2} WANG Wei^{1,2} ZHONG Bin³ JIN Qi³ WANG Bo^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment,
China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Collaborative Innovation Center for Gannan Oil Tea Camellia Industrial Development,
Gannan Medical University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: After batch of *Camellia oleifera* are peeled, the shells and seeds of *Camellia oleifera* are mixed together. In order to ensure the quality of camellia oil, clean seeds should be obtained. Currently, seeds are picked out manually, which is time-consuming and laborious with low efficiency. Therefore, a belt screen seed sorter for *Camellia oleifera* fused with photoelectric color sorting technology was designed. Firstly, according to the characteristic differences of *Camellia oleifera* shells and seeds in friction angle and collision coefficient, the vibrating belt screen was designed for initial separation. Secondly, the difference in gray value was used to carry out secondary photoelectric separation of residual seeds in the shell of after belt separation. Kinematics and dynamics analysis of *Camellia oleifera* shells and seeds on the belt screen showed that the main factors affecting the screening rate of the vibrating belt were belt inclination (*A*), belt speed (*B*) and vibration frequency (*C*). Based on the cleanliness rate of the seed and the ratio of seeds in shell, the orthogonal rotation combination test was carried out. When the belt inclination angle was 19°, the belt speed was 1.50 m/s, and the vibration frequency was 55.40 Hz, the index parameters of the seed box cleaning rate were 95.52% and the ratio of seeds in shell was 24.30%. The optimal parameters were tested and verified, and the results were reliable. The photoelectric sorting test for materials with different seed ratios showed that the cleanness rate of the seed was stable at

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1603500)、赣南油茶产业开发协同创新中心PI项目(YP201606)和国家自然科学基金面上项目(31772062)
作者简介: 鹿瑶(1993—),女,博士生,主要从事农副产物无损检测及设备研究,E-mail: lyao@cau.edu.cn
通信作者: 王伟(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事农副产物无损检测及设备研究,E-mail: playerwxw@cau.edu.cn

98.23% , and the ratio of seeds in shell remained at 2.34% , indicating that the photoelectric sorting can accurately identify and sort out the *Camellia oleifera* seeds. The optimal parameter test results of the whole machine showed that the average cleaning rate of *Camellia oleifera* seeds in the two seed boxes of machine and the ratio of seeds in shell was 97.55% and 3.27% , respectively. This belt screen seed sorter for *Camellia oleifera* based on photoelectric color separation realized the efficient separation of camellia hulls and seeds, laying a foundation for the subsequent improvement of the quality of camellia oil.

Key words: *Camellia oleifera*; shell and seed separator; photoelectric color sorting; vibrating belt screen

0 引言

油茶与油橄榄、油棕、椰子并称为世界四大木本油料植物,其中油茶是我国特有的木本油料植物,每年总产量高达 $1.2 \times 10^6 \text{ t}^{[1-3]}$ 。油茶果由油茶籽和油茶壳组成,油茶籽含油率高达 40% ~ 50% ,其中茶油是油茶籽的主要深加工产物,被誉为“东方橄榄油”^[4-6]。油茶壳不含油脂^[7],只含木质素、多缩戊糖、鞣制及皂素等成分,并不适合与油茶籽混合加工进行榨油提取,因此需对脱壳后的油茶果壳籽混合物料进行分离清选。

现阶段,油茶果壳籽分离问题一直制约着油茶产业的规模化发展^[8-9]。国外目前只有东南亚地区种植少量油茶,有关油茶果壳籽清选技术的研究鲜见报道^[10]。国内现有的脱壳机可在油茶果脱壳的同时实现壳籽初选,但该阶段的清选为基于尺寸的筛选,油茶果壳籽混杂率依然很高,需要人工手动分选,费时费力、成本高^[11-12]。国内学者针对脱壳后油茶果壳籽分离清选这一焦点问题进行了一系列研究。蓝峰等^[13]利用壳籽的外形差异设计了一组弧形齿光辊与对辊清选机构,对于油茶果破壳效果非常好,但对于不同尺寸混杂的油茶果壳籽分选适用效果一般。李立君等^[10]利用振动筛分原理设计了一种曲柄摇杆式振动筛,通过壳籽质量不同所获动能不同的原理实现壳籽从不同通道排出,但该装置只适用于尺寸分级后的油茶果壳籽,对同质量壳籽的分离能力仍有待提高。周敬东等^[14]利用壳籽的颜色差异设计了油茶果壳籽色选机,物料经过相机拍摄区域进行图像采集后,依次有序地进入通道式物料导向管,控制系统驱动各通道内步进电机转动,带动拨片摆动,实现壳籽分离,其分选效果较好,但工作效率较低,不适用于规模化作业。综述现阶段国内的油茶果壳籽分选机,虽原理设备多样,但仍不能同时达到高清洁率及高效性的要求,不能满足油茶规模化和产业化发展的需求。

为有效完成脱壳后油茶果壳籽物料的精准分选,提高整个山茶油产品的品质和附加值,亟需开发能高效稳定取代人工的油茶果壳籽精准分选设备,

对油茶果产业链的发展至关重要^[15]。

本文设计一种融合光电色选的皮带筛式油茶果壳籽分选机,融合振动皮带筛初级分选与双 CCD 光电色选技术,以期在保证振动皮带筛下端茶籽清洁率最优的同时,对皮带上端油茶果壳中携带的少部分油茶籽进行光电精准剔除,为油茶果壳籽规模化、精准化、高效化分选提供技术支撑和理论参考。

1 结构与工作原理

1.1 油茶果壳籽分选机总体结构

油茶果壳籽分选机包括振动喂料装置、振动皮带筛、倾角可调机架、基于双 CCD 的光电色选模块、电磁阀剔除装置、籽箱、壳箱等,结构示意图如图 1 所示。

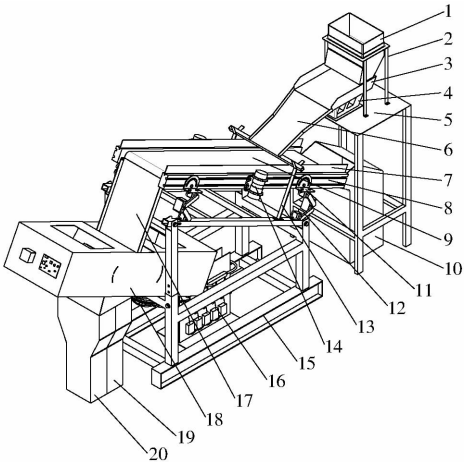


图 1 油茶果壳籽分选机整机结构示意图
Fig.1 Structural diagram of sorting machine for *Camellia oleifera* shells and seeds

1. 料斗 2. 料斗支架 3. 出料装置 4. 振动喂料器 5. 喂料机架 6. 导料板 7. 挡板 8. 皮带平台 9. 皮带 10. 籽箱 I 11. 连接板 12. 弹性支撑 13. Y 形支架 14. 振动电机 15. 机架 16. 喷气阀 17. 滑板 18. 光电箱 19. 壳箱 20. 籽箱 II

1.2 工作原理

分选作业时,将待分选的油茶果壳籽混合物料倒入料斗中,如图 2 所示,在振动喂料器的抖动下,油茶果壳籽均匀、单层地落至出料装置平台,并经由导料板落至振动皮带筛上。皮带以最优速度运转的

同时两侧振动电机提供激振力,使得落至皮带上的油茶籽不断弹跳。油茶籽呈类球形且表面光滑,在重力及激振力作用下沿皮带向下滚落入籽箱 I;油茶果壳呈扁平状且表面粗糙,摩擦力较大而自身质量较小,随皮带向上输送。当油茶果扁平面与皮带接触时,不易滚落而随果壳一起被向上输送。大量的壳掺杂少部分籽经由皮带上端滑板滑至光电箱内,从相机和背景板之间穿过,在光源的辅助下,CCD 相机实时采集并处理油茶物料图像信息,识别出籽所在通道并发出指令驱动相应电磁阀动作,喷出高压气体将油茶籽吹至籽箱 II,壳自动掉落至壳箱,实现油茶果壳籽的精确分选。

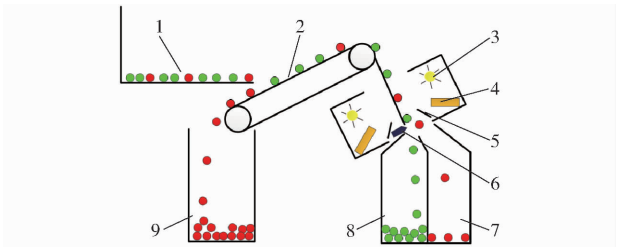


图 2 油茶果壳籽分选机原理图

Fig. 2 Schematic of sorting machine for *Camellia oleifera* shells and seeds

1. 喂料装置 2. 振动皮带筛 3. 光源 4. 摄像头板 5. 背景
6. 喷嘴 7. 籽箱 II 8. 壳箱 9. 籽箱 I

2 振动皮带筛关键部件设计

2.1 振动皮带筛运动参数分析

振动皮带筛主要由皮带、安装在皮带两侧的振动电机以及连接皮带体与机架起振动缓冲作用的 4 个橡胶弹性支撑组成。由于油茶果壳与籽在形状、摩擦角以及弹跳系数方面的差异,两者落至倾斜皮带的运动状态也不同,半球状的油茶籽弹跳滚落至下端籽箱,扁平状的油茶壳“平趴”向上输送至壳箱。分选原理如图 3 所示,图中 L 为皮带总长, l 为皮带分选区长度, v_0 为皮带转速, v_1 为油茶籽在皮带上的速度, v_2 为油茶果壳在皮带上的速度。

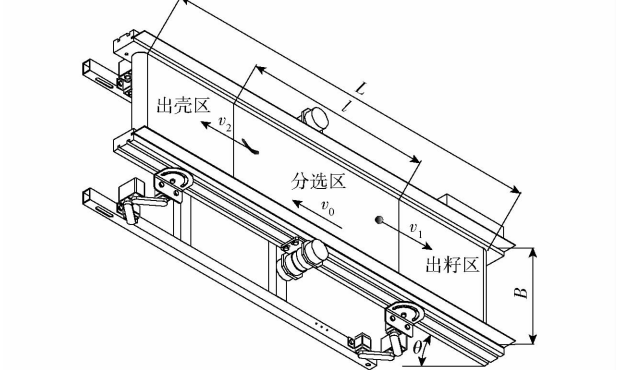


图 3 振动皮带筛分选原理图

Fig. 3 Principle diagram of vibrating belt screening

皮带两侧平行安装有两台同型号的振动电机,两振动电机的偏心块同步反向转动,其产生的激振力在平行于皮带平面方向的分力相互抵消,而垂直于皮带平面的激振力相互叠加,使整个皮带体在连续激励下发生微幅直线运动^[16-17],其激振力为

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 2m_0\omega^2r_0\cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_x ——沿皮带平面的激振力, N
 F_y ——垂直皮带平面的激振力, N
 m_0 ——单台振动电机偏心块质量, kg
 r_0 ——振动电机的偏心距, m
 ω ——电机旋转角速度, rad/s
 t ——分选时间, s

皮带所获得的能量在分选过程中传递给油茶物料,物料获得能量后转换为动能进而产生一定的加速度在皮带表面开始运动直至完成最后的分选过程。但是皮带将能量传递给油茶物料时,由于油茶果壳与油茶籽自身特性的区别导致物料颗粒获得的振动能量存在一定差异。为便于对不同物料颗粒进行受力分析,引入颗粒振动惯性系数 λ 对不同物料颗粒分析,可得振动惯性力^[18]为

$$F_{vy} = \lambda m \omega^2 r \cos(\omega t) \quad (0 < \lambda < 1) \quad (2)$$

其中 $\omega = 2\pi f$
式中 F_{vy} ——油茶颗粒的振动惯性力, N
 f ——振动电机振动频率, Hz
 m ——颗粒质量, kg
 r ——物料颗粒的当量半径, mm

在本设备中,振动电机的作用为提高油茶籽在倾斜皮带上的弹跳率,油茶籽弹跳率越高,则其滚落至籽箱的概率越大;同时,在增加振动电机振动频率 f 时,还应考虑到,该振动频率不能打破油茶壳在皮带上的平衡状态,应使其继续向上输送至壳箱,否则若将油茶壳振落至籽箱,则不能保证壳籽的分离准确率。因此应选取一个合适的振动电机振动频率 f , 提高油茶籽弹跳率的同时减少对油茶果壳的影响。通过开展皮带静态试验来确定振动电机的选取范围,放适量油茶果混合物料于静止的皮带上,开启振动电机。通过皮带静态试验可知,当电机振频为 30 Hz 时,油茶籽开始从皮带上滚落,当电机振频为 70 Hz 时,所有物料全部滚落,因此此处选取 30 ~ 70 Hz 作为电机振动频率的调节范围。

本设计在皮带体下部安装 4 个橡胶弹性支撑,与机架的主横梁连接起到主振弹簧的作用。当主振区受外界扰动时,橡胶弹性支撑具有非线性、变刚度、大阻尼、多维受载等特性,能够满足该油茶果壳

籽分选机的使用要求^[19]。

2.2 油茶籽运动受力分析

取振动皮带筛上的单粒油茶籽为研究对象,油茶籽经由喂料振动装置及导料板落至振动皮带筛,然后在皮带筛及振动电机的作用下产生弹跳运动,其在皮带筛上的运动状态如图 4 所示,为简化问题,忽略物料群体之间的作用力^[20-21]。

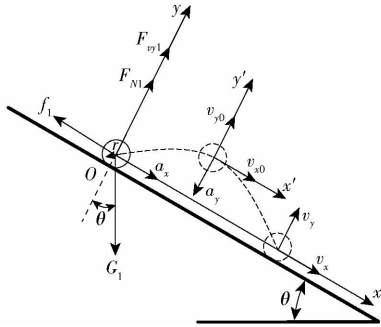


图 4 油茶籽运动分析简图

Fig. 4 Motion analysis diagram of *Camellia oleifera* seeds

对落至皮带筛上的油茶籽受力分析可得

$$\begin{cases} F_{N1} + F_{vy1} - G_1 \cos \theta = 0 \\ G_1 \sin \theta - m_1 j - f_1 = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中 F_{vy1} ——油茶籽振动惯性力,N
 F_{N1} ——油茶籽所受支持力,N
 G_1 ——油茶籽重力,N
 j ——沿皮带斜面的角加速度,rad/s²
 θ ——皮带倾角,(°)
 f_1 ——油茶籽所受摩擦力,N
 m_1 ——油茶籽质量,kg

对 O 点求力矩

$$f_1 r - J \alpha - F_{N1} e = 0 \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} F_{N1} = G_1 \cos \theta - F_{vy1} \\ f_1 = \mu_1 F_{N1} \\ J = \frac{2}{5} m_1 r^2 \\ G_1 = m_1 g \end{cases} \tag{5}$$

式中 α ——油茶籽转动角加速度,rad/s²
 μ_1 ——油茶籽与皮带面的摩擦因数
 e ——油茶籽实际重心与当量重心间偏心距,mm

J ——油茶籽的转动惯量,kg·m²
由式(3)~(5)可得油茶籽相对皮带的运动方程

$$G_1 r \sin \theta - m_1 j r - \frac{2}{5} m_1 \alpha r^2 - G_1 e \cos \theta + \lambda e m_1 \omega^2 r \cos(\omega t) = 0 \tag{6}$$

则平行于皮带的加速度 a_x 为

$$a_x = \frac{5}{7r} G_1 (r \sin \theta - e \cos \theta) + \frac{5}{7} \lambda m_1 \omega^2 e \cos(\omega t) \cos \theta \tag{7}$$

当皮带倾斜至一定程度时,油茶籽被抛离,此时有 $F_{N1} = 0$,则垂直于皮带的加速度为

$$a_y = \frac{5}{7} G_1 \sin \theta \tag{8}$$

当油茶籽落在振动皮带上时,油茶籽速度为

$$\begin{cases} v_x = v_{x0} + \lambda \omega \cos(\omega t) \cos \theta \\ v_y = v_{y0} + \lambda \omega \cos(\omega t) \sin \theta \end{cases} \tag{9}$$

式中 v_{x0} 、 v_{y0} ——茶籽沿皮带发生碰撞前相对于皮带的水平速度和垂直速度,m/s
 v_x 、 v_y ——茶籽平行于皮带及垂直于皮带的相对入射分速度,m/s

由于油茶籽质量 m_1 远小于皮带系统的质量 m' , δ_1 、 δ_2 分别代表油茶籽与皮带碰撞前后的入射角和反射角,则根据碰撞原理^[22],有

$$\begin{cases} \tan \delta_1 = \frac{v_x}{v_y} \\ \tan \delta_2 = \frac{v_x}{kv_y} \end{cases} \tag{10}$$

式中 k ——弹性恢复系数
当 $\delta_1 < \delta_2$ 时,油茶籽沿皮带向下运动,当 $\delta_1 > \delta_2$ 时,油茶籽沿皮带向上运动,增加皮带倾角 θ 有利于油茶籽沿皮带向下落入籽箱,但同时会增加油茶壳滚落的可能,为提高油茶果壳籽分离率,必须满足

$$\theta \leq \arcsin \frac{F - f_1}{G_1} \tag{11}$$

式中 F ——油茶籽沿皮带平面所受合力,N

通过文献[23]可知,油茶果壳在皮带上的滑动摩擦角为 30°左右,相互之间差异不大。油茶籽由于形状不同,其滑动摩擦角亦不同,且差异较大:类球形油茶籽滑动摩擦角小于 5°,半球形和橘瓣形滑动摩擦角在 10°左右,而不规则多面体形状的油茶籽滑动摩擦角在 15°左右。因此,设定皮带倾角调节范围为 16°~30°^[24]。

2.3 油茶果壳运动分析

油茶果壳在振动喂料装置及导料板的作用下,以“单层均匀”的状态轻轻抖落至分选区,由于导料板长度较长、坡度较小,对物料有缓冲作用,物料脱离导料板时,可视作初速度为 0 的自由落体运动。油茶果壳速度 v_2 小于皮带速度 v_0 ,刚掉落的油茶果壳相对皮带做加速度为 a 的均加速直线运动,对油茶果壳进行受力分析如图 5 所示^[25]。

根据受力分析可知,油茶果壳受力有重力 G_2 、皮带表面摩擦力 f_2 以及振动惯性力 F_{vy2} ,根据牛顿

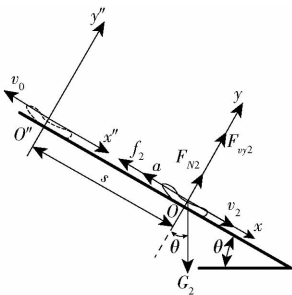


图 5 油茶果壳运动受力分析示意图

Fig. 5 Motion analysis of *Camellia oleifera* shells

第二定律可得

$$\begin{cases} m_2 a = f_2 - G_2 \sin \theta \\ F_{N2} = G_2 \cos \theta - F_{vy2} \\ f_2 = \mu_2 F_{N2} \\ G_2 = m_2 g \end{cases} \quad (12)$$

式中 m_2 ——油茶果壳质量, kg

f_2 ——油茶果壳所受摩擦力, N

G_2 ——油茶果壳重力, N

F_{N2} ——油茶果壳支持力, N

F_{vy2} ——油茶果壳振动惯性力, N

μ_2 ——油茶果壳与皮带的摩擦因数

油茶果壳加速至皮带速度所需时间 t' 及该段时间内的油茶果壳位移 s 分别为

$$\begin{cases} t' = \frac{v_0 - v_2}{a} \\ s = v_2 t' + \frac{1}{2} a t'^2 \end{cases} \quad (13)$$

其中 $v_2 = \sqrt{2gh}$

式中 h ——导料板末端到皮带的垂直距离, mm

当 $v_2 = v_0$ 时, 油茶果壳匀速运动, 相对于传送带静止。

为保证油茶果壳与籽两者能均够以稳定的状态分别进入壳箱及籽箱, 应满足^[15]

$$L \geq \frac{B v_0 l'}{v_r} \quad (14)$$

式中 B ——皮带宽度, mm

v_r ——油茶籽下滚的平均速度, m/s

l' ——油茶籽从皮带落下时跟随皮带走过的距离, 取 1 500 mm

皮带速度 v_0 影响油茶果壳籽分选的性能、效率和结构尺寸^[26]。 v_0 越大, 在分选性能一定时, 分选效率越高, 但油茶果壳与皮带相对静止所用时间越长, 缓冲距离越长, 要求皮带长度 L 越长, 整体机型结构变大, 因此经多次预试验选择皮带速度调节范围为 0.5 ~ 2.5 m/s。该分选机倾斜皮带长度为 2 500 mm, 宽度为 300 mm, 下料位置处于皮带中间

位置, 经多次试验验证, 该皮带参数可以满足油茶果壳籽的分离要求。

在倾斜皮带试验过程中发现, 批量油茶物料落在皮带平面上进行分选作业时, 籽与籽、籽与壳甚至壳与壳之间均会存在相互作用力。在分选过程中, 油茶籽在沿皮带斜面向下滚动的过程中会被静止在皮带上的壳阻挡而被迅速带入壳箱。因此, 物料经过倾斜皮带分选后, 壳籽清洁率并没有达到预期效果, 因此此处选择采用光电二次分选的方式进一步筛选出壳中混杂的籽, 该方式极大地提高了茶籽清洁率, 降低了茶籽废弃率, 为实现茶籽精准分选提供了技术支持。

3 光电色选模块设计

光电色选模块的核心是图像采集控制模块设计、油茶果壳籽灰度辨别方法以及皮带分选模块衔接设计, 这对壳籽分选至关重要。

3.1 图像采集控制模块

当油茶果壳中混杂有少量籽的物料经由皮带上端滑至光电分选箱时, 图像采集控制模块开始动作。如图 6 所示, 控制系统主要由主控制单元 FPGA、图像采集部分的线阵 CCD 相机和 AD 转换器、电磁阀剔除装置^[27-29]等组成。FPGA 产生 CCD 相机和 AD 转换芯片的驱动时序以正常采集图像, 并将模拟信号转换为数字信号送入 FPGA, 继而 FPGA 对数据进行处理后输出控制信号控制电磁阀动作, 将油茶籽吹入籽箱 II。在该图像采集控制处理过程中, 最为关键的是确保油茶果壳籽的判别准确性。

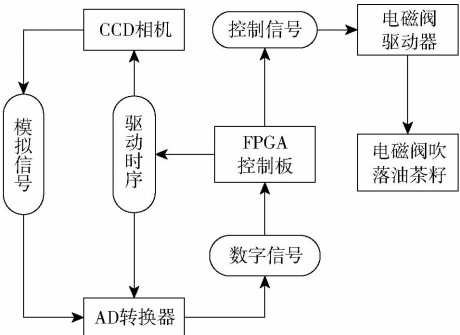


图 6 控制系统总体设计简图

Fig. 6 Overall design of control system

3.2 油茶果壳、籽图像特征识别

为准确清选出油茶果壳中掺杂的少部分籽, 现以江西赣州地区新鲜油茶果为试验样品, 如图 7 所示。由图可看出, 油茶籽呈褐黑色, 果壳外表面呈现红褐色且略微泛绿, 果壳内表面呈褐黄色, 稍微泛白。

本研究所用相机为线阵 CCD 相机, 逐行扫描以获取物料二维平面灰度图。将油茶果壳与油茶籽放



图 7 油茶果壳籽混杂物料

Fig. 7 Mix materials of *Camellia oleifera* seeds and shells

在匀速运动的皮带上,线阵 CCD 相机放于皮带正上方,采集并保存皮带上流过的物料图像信息,扫描获取其灰度图像。基于采集到的图像进行特征统计,统计油茶果壳与油茶籽的灰度分布情况,并基于统计结果,将油茶果壳与油茶籽区分开来。

采集到的油茶物料灰度图像如图 8 所示,共采集 9 个物料,从左至右依次是籽、内壳、外壳、内壳、籽、内壳、外壳、籽。图像分辨率为 2 048 像素 × 160 像素,随机选取第 80 行像素的灰度(红色直线标识),将 2 048 像素 × 75 像素的图像在横向上划分 64 个小图像区域,将像素值平均后得到多行像素点对应的平均灰度,用 Matlab 对灰度曲线做平滑处理后,可更直观地统计该图像每行像素点对应的灰度。

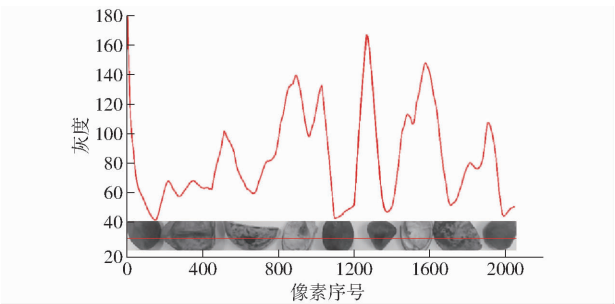


图 8 油茶果壳籽混杂物料灰度图

Fig. 8 Mixed material by *Camellia oleifera* seeds and shells

由图 8 可以看出,油茶籽区域对应的灰度均在 50 以下,背景灰度均值在 100 以上,油茶果外壳及内壳区域灰度分布在 50 ~ 100 之间,为了避免偶然性,本研究重复 3 次试验均得到相同的统计结果,该分析结果证明线阵 CCD 相机可准确辨识油茶果壳与油茶籽。

4 倾斜皮带分选试验与结果分析

4.1 试验装置

基于理论分析及参数设计,对油茶果壳籽精准分选机进行样机加工和试制,样机如图 9 所示。为得到皮带分选模块的最优参数,现针对机械部分倾斜皮带分选装置开展正交试验分析。



图 9 油茶果壳籽分选机样机

Fig. 9 Experiment platform of sorting machine for *Camellia oleifera* shells and seeds

4.2 试验设计与方法

以江西赣州地区刚采摘的新鲜油茶果为试验对象,开展油茶果脱壳后壳籽分选试验研究。通过前期预试验及理论分析,影响倾斜皮带分选效果的主要因素有:皮带倾角 θ 、皮带速度 v_0 以及振动电机振动频率 f 。为深入研究上述 3 个因素对倾斜皮带装置壳籽分选效果,本试验以籽箱清洁率 Y_1 、壳中含籽率 Y_2 作为衡量分选品质的标准,进行二次旋转正交组合试验。利用响应面分析法对试验结果进行分析,研究 θ 、 v_0 、 f 三因素(编码值分别为 A、B、C)对分选效果的综合影响,并建立回归方程以及优化模型。试验设计方案因素编码如表 1 所示。由于实际操作过程中皮带倾角的精度无法调至 0.01 的水平,因此取整数值进行试验。

表 1 试验因素与编码

Tab.1 Experimental factors and levels

编码	因素		
	皮带倾角 $\theta/(^{\circ})$	皮带速度 $v_0/(m \cdot s^{-1})$	振动频率 f/Hz
-1.682	16	0.50	30.00
-1	19	0.91	38.11
0	23	1.50	50.00
1	27	2.09	61.89
1.682	30	2.50	70.00

注:选取中心点的试验次数为 9 次。

4.3 试验指标

(1) 籽箱清洁率:皮带下端籽箱 I 中,油茶籽质量与物料总质量的比率,计算式为

$$Y_1 = \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \times 100\%$$
 (15)

式中 m'_1 ——皮带下端出籽的质量,kg

m'_2 ——皮带下端出壳的质量,kg

(2) 壳中含籽率:皮带上端油茶籽质量占皮带上下端油茶籽总质量的比例,计算式为

$$Y_2 = \frac{m_3}{m'_1 + m_3} \times 100\%$$
 (16)

式中 m_3 ——皮带上端出籽的质量,kg

4.4 试验结果与分析

4.4.1 试验结果

根据表 1 中各因素水平,采用 Central - Composite 试验设计原理设计三因素五水平正交试验,其共包括 23 组试验,试验方案及结果如表 2 所示。

表 2 试验方案及结果

Tab.2 Test plan and experimental results

试验 次数	因素			指标	
	皮带 倾角	皮带 速度	振动 频率	籽箱 清洁率	壳中 含籽率
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	93.52	31.89
2	1	-1	-1	89.94	27.75
3	-1	1	-1	92.65	28.16
4	1	1	-1	87.56	27.12
5	-1	-1	1	85.68	12.58
6	1	-1	1	80.01	11.10
7	-1	1	1	95.74	19.70
8	1	1	1	91.18	16.67
9	-1.682	0	0	92.16	25.46
10	1.682	0	0	80.37	14.79
11	0	-1.682	0	87.52	28.31
12	0	1.682	0	94.79	32.05
13	0	0	-1.682	90.22	27.80
14	0	0	1.682	79.93	11.77
15	0	0	0	90.31	20.39
16	0	0	0	91.15	21.92
17	0	0	0	89.35	16.84
18	0	0	0	91.97	19.56
19	0	0	0	88.49	18.97
20	0	0	0	90.03	23.38
21	0	0	0	89.66	15.56
22	0	0	0	93.17	20.84
23	0	0	0	87.08	19.72

4.4.2 回归模型建立及显著性分析

利用 Design-Expert 软件对表 2 试验结果进行多元回归拟合分析^[30],得到籽箱清洁率 Y_1 及壳中含籽率 Y_2 2 个试验指标的回归方程,并验证其显著性。

(1)籽箱清洁率 Y_1

通过对试验数据的分析和拟合,籽箱清洁率 Y_1 方差分析如表 3 所示。由表 3 可知,试验整体模型极显著($P<0.01$),线性主效应项中皮带倾角 A 、皮带速度 B 以及振动频率 C 三因素对试验指标茶籽清洁率 Y_1 影响极显著($P<0.01$),交互项 BC 对试验指标影响极显著($P<0.01$),二次主效应项中振动电机振动频率 C 的二次项对试验指标影响显著($0.01\leq P<0.05$),其他各项不显著。各因素对籽箱清洁率 Y_1 影响的主次顺序为 A 、 B 、 C 。将不显著

交互项和二次主效应项的回归平方和、自由度并入残差项,剔除不显著因素,再次进行方差分析,结果如表 3 所示。得到各因素水平对籽箱清洁率 Y_1 影响的回归方程为

$$Y_1=90.06-2.91A+2.29B-2.00C+3.18BC-1.31C^2$$

(17)

对回归方程(式(17))进行失拟性检验,如表 3 所示,其中失拟项 $P=0.1882$,不显著($P>0.1$),表明不存在影响试验指标的其他因素水平存在,且试验指标与试验因素存在显著的二次关系,试验分析结果合理。

(2)壳中含籽率 Y_2

通过对试验数据分析和拟合,壳中含籽率 Y_2 分析结果如表 3 所示。由表 3 可知,试验整体模型极显著($P<0.01$),线性主效应项中振动频率 C 对试验指标壳中含籽率 Y_2 影响极显著($P<0.01$),二次主效应项中皮带速度 B 的二次项对试验指标影响极显著($P<0.01$),线性主效应项中皮带倾角 A 及皮带速度 B 对试验指标影响显著($0.01\leq P<0.05$),交互项 BC 对试验指标影响显著($0.01\leq P<0.05$),其他各项不显著。各因素对壳中含籽率 Y_2 影响的主次顺序为 C 、 A 、 B 。将不显著交互项和二次主效应项的回归平方和、自由度并入残差项,剔除不显著因素,再次进行方差分析,结果如表 3 所示。得到各因素水平对壳中含籽率 Y_2 影响的回归方程为

$$Y_2=19.20-2.10A+1.74B-6.07C+2.26BC+4.23B^2$$

(18)

对回归方程(式(18))进行失拟项检验,如表 3 所示,其中失拟项 $P=0.3091$,不显著($P>0.1$),表明不存在影响试验指标的其他因素水平存在,且试验指标与试验因素存在显著的二次关系,试验分析结果合理。

4.4.3 响应曲面分析

利用 Design-Expert 对试验数据进行分析处理,得出皮带倾角、皮带速度和振动频率之间的交互因素对籽箱清洁率和壳中含籽率的影响效应响应曲面,如图 10 所示。

对于籽箱清洁率 Y_1 ,皮带速度和振动频率的交互影响如图 10a 所示。当振动频率固定时,籽箱清洁率与皮带速度呈正相关,较优的皮带速度范围为 1.20~1.80 m/s;当皮带速度固定时,籽箱清洁率随振动频率的增大而减小,振动频率的较优选择范围为 38.11~57.14 Hz。

对于壳中含籽率 Y_2 ,皮带速度和振动频率的交互影响如图 10b 所示。当振动频率固定时,壳中含

表 3 试验结果方差分析

Tab. 3 Variance analysis of experimental results

项目	变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
籽箱清洁率 Y_1	模型	375.01/350.02	9/5	41.67/70.00	9.27/14.27	0.000 2 **/ <0.000 1 **
	<i>A</i>	115.57/115.57	1/1	115.57/115.57	25.72/23.55	0.000 2 **/0.000 1 **
	<i>B</i>	71.31/71.31	1/1	71.73/71.31	15.87/14.53	0.001 6 **/0.001 4 **
	<i>C</i>	54.84/54.84	1/1	54.84/54.84	12.20/11.18	0.004 0 **/0.003 9 **
	<i>AB</i>	0.24	1	0.24	0.055	0.819 0
	<i>AC</i>	0.82	1	0.82	0.18	0.676 4
	<i>BC</i>	81.15/81.15	1/1	81.15/81.15	18.06/16.54	0.000 9 **/0.000 89 **
	A^2	12.49	1	12.49	2.78	0.119 4
	B^2	11.27	1	11.27	2.51	0.137 3
	C^2	27.16/27.15	1/	27.16/27.15	6.04/5.53	0.028 8 */0.031 0 *
	残差	58.42/83.41	13/17	4.49/4.91		
	失拟项	31.89/56.88	5/9	6.38/6.32	1.92/1.91	0.196 0/0.188 2
	总和	433.43/433.43	22/22			
壳中含籽率 Y_2	模型	936.05/928.25	9/5	104.01/185.65	11.96/26.12	<0.000 1 **/ <0.000 1 **
	<i>A</i>	60.04/60.04	1/1	60.04/60.04	6.91/8.45	0.020 9 */0.009 8 **
	<i>B</i>	41.17/41.17	1/1	41.17/41.17	4.74/5.79	0.048 6 */0.027 7 **
	<i>C</i>	502.36/502.36	1/1	502.36/502.36	57.78/70.68	<0.000 1 **/ <0.000 1 **
	<i>AB</i>	0.81	1	0.81	0.093	0.764 6
	<i>AC</i>	0.35	1	0.35	0.040	0.844 4
	<i>BC</i>	40.73/40.73	1	40.73/40.73	4.68/5.73	0.049 6 */0.028 5 *
	A^2	2.48	1	2.48	0.28	0.602 6
	B^2	283.09/283.96	1/1	283.09/283.96	32.56/39.95	<0.000 1 **/ <0.000 1 **
	C^2	4.21	1	4.21	0.48	0.498 6
	残差	113.02/120.82	13/17	8.69/7.11		
	失拟项	66.90/74.71	5/9	13.38/8.30	2.32/1.44	0.138 8/0.309 1
	总和	1 049.07/1 049.07	22/22			

注：“/”后数字为剔除不显著因素后方差分析结果，**表示极显著($P<0.01$)，*表示显著($0.01\leq P<0.05$)。

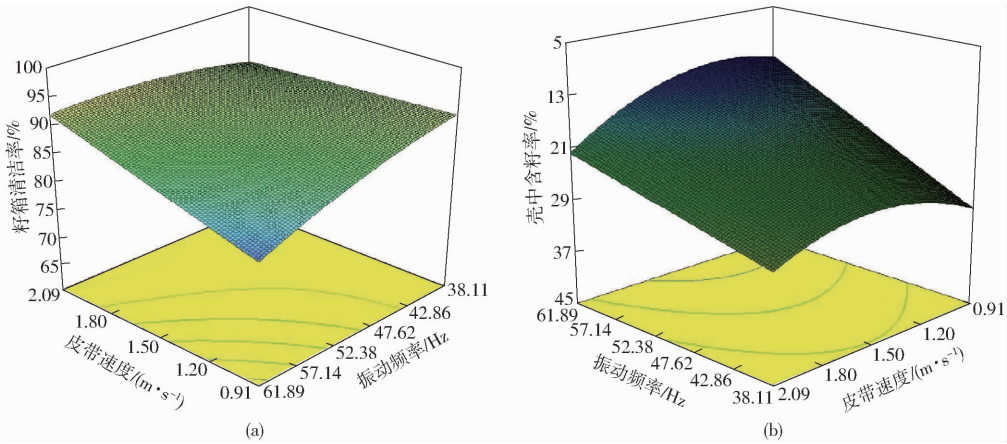


图 10 双因素响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of double parameters

籽率随皮带速度的增大而先增大后减小,皮带速度的较优范围为 0.91 ~ 1.80 m/s;当皮带速度固定时,壳中含籽率随振动频率的减小而减小,振动频率的较优范围为 40.50 ~ 61.89 Hz。

为获得倾斜皮带分选装置较优茶籽分选性能的作业参数,利用 Design-Expert 的 Optimization 功能对 2 个回归模型进行优化求解,根据倾斜皮带分选装

置的实际作业条件和工作要求,首先选择目标函数和约束条件

$$\begin{cases} \max Y_1(\theta, v_0, f) \\ \min Y_2(\theta, v_0, f) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 19^\circ \leq \theta \leq 27^\circ \\ 0.91 \text{ m/s} \leq v_0 \leq 1.80 \text{ m/s} \\ 38.11 \text{ Hz} \leq f \leq 61.89 \text{ Hz} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

由于本设备针对壳中油茶籽设置有光电二次分选,因此设置籽箱清洁率重要性为 5,设置壳中含籽率重要性为 1,根据约束条件,对目标函数进行优化求解,得到多种优化后的参数组合,从中选取较优的参数组合:皮带倾角为 19°,皮带速度为 1.50 m/s,振动频率为 55.40 Hz 时,其对应的籽箱清洁率为 95.52%,壳中含籽率为 24.30%。

为验证倾斜皮带最优参数选择的合理性,在相同试验条件下进行验证试验,其结果为:籽箱清洁率为 96.12%,壳中含籽率为 26.38%,由此可见,振动皮带筛优化结果可信。

4.5 光电分选试验

根据倾斜皮带正交试验结果可知,壳中含籽率的变动范围为 11.10% ~ 32.05%,因此,为实现整机茶籽高清洁率以及倾斜皮带与光电模块的良好衔接性,光电分选模块需针对壳中含籽率为 40% 及以下的混合物料实现精准分选。

配备含籽率为 10%、20%、30%、40% 的混合油茶物料各 3 份,每份样品物料 5 kg,对光电分选模块的作业效果进行验证。混合物料经由滑板进入 CCD 相机视场(图 11),经由喷嘴剔除,实现壳籽分离。每个含籽率的物料重复 3 次试验,记录每次试验后籽箱清洁率及壳中含籽率并求其平均值,试验结果如表 4 所示。



图 11 光电色选试验

Fig. 11 Separation test of photoelectric color device

表 4 试验结果
Tab.4 Test results

样品含 籽率/%	籽箱清洁率/%				壳中含籽率/%			
	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
10	99.23	98.12	99.47	98.94	1.62	1.37	2.11	1.70
20	98.64	99.11	98.42	98.72	2.80	1.07	3.46	2.44
30	97.14	98.45	98.30	97.96	1.90	2.65	2.09	2.21
40	97.39	97.71	96.80	97.30	2.73	3.49	2.83	3.02
平均值				98.23				2.34

由表 4 可知,经光电箱分选后的油茶果壳籽具有较高的分离率,而且不同茶籽比率的物料籽箱清洁率稳定在 98.23% 左右,壳中含籽率保持在 2.34% 左右,说明光电分选可准确识别并分选出混

杂物料中的油茶籽。除此之外,随着茶籽比率的增加,其籽箱清洁率略有降低,壳中含籽率略有升高,说明随茶籽比率的增加,喷气阀相同时间内需识别并喷吹的次数增加,其喷吹准确率会略有降低。以上数据分析证明了倾斜皮带初次分选与光电二次分选有机结合的优势,该设计既实现了下端茶籽清洁率最高,又保证了红外分选模块无需高频喷吹,为油茶壳籽精准分选提供了技术支持和理论依据。

4.6 整机油茶果壳籽分选试验

综合倾斜皮带分选正交试验最优参数及光电分选试验结果,开展整机油茶壳籽分选试验。将倾斜皮带参数调整为最优,即:皮带倾角 19°、皮带速度为 1.50 m/s、振动频率 55.40 Hz,并将光电分选模块调至最优状态,开始进行油茶壳籽整机分选试验。分选结果表明:籽箱 I 中茶籽清洁率为 96.23%,籽箱 II 中茶籽清洁率为 98.86%,壳箱中含籽率为 3.27%,油茶果壳籽精准分选机分选准确率及工作稳定性满足分选要求,成功实现了油茶壳籽的精准分选。

5 结论

(1)充分利用油茶果壳、籽在摩擦因数、碰撞系数以及灰度图像上的特性差异,研究设计了一种融合光电分选的皮带筛式油茶果壳籽分选机。对整机结构及工作原理进行了介绍,并对关键部件振动皮带筛、光电色选装置进行了理论分析。经分析可得,该机可实现油茶果壳、籽的高效分选。

(2)选取皮带倾角、皮带速度和振动频率为试验因素,以籽箱清洁率、壳中含籽率为试验指标,进行了二次旋转正交组合试验,建立了试验指标与影响因素的回归模型。结果表明,当皮带倾角为 19°、皮带速度为 1.50 m/s、振动频率为 55.40 Hz 时,其对应的籽箱清洁率为 95.52%、壳中含籽率为 24.30%。最优组合样机试验得出籽箱清洁率为 96.12%,壳中含籽率为 26.38%,验证了振动皮带筛设计的合理性。

(3)针对壳中残留的 11.10% ~ 32.05% 的油茶籽,采用二次光电色选装置进行剔除。试验结果表明:随茶籽比率的增加,其籽箱清洁率略有降低,壳中含籽率略有升高,但籽箱清洁率均稳定在 98.23% 左右,壳中含籽率保持在 2.34% 左右,说明光电分选可准确识别并分选出混杂物料中的油茶籽。

(4)开展整机油茶果壳籽分选试验,两籽箱茶籽平均清洁率可达到 97.55%,壳中含籽率为 3.27%,验证了整机设计的合理性及壳籽分选的高效性,为提高后续山茶油等深加工产品质量奠定基础。

参考文献

- [1] 王凤贺,丁冶春,陈鹏泉,等. 油茶籽热风干燥动力学研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):426-432.
WANG Fenghe, DING Yechun, CHEN Pengxiao, et al. Investigation on hot-air drying of *Camellia oleifera* seeds [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Sup.): 426-432. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s058&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.058. (in Chinese)
- [2] 周薇,吴雪辉. 油茶综合利用开发前景[J]. 中国农村科技,2006(10):21-23.
ZHOU Wei, WU Xuehui. Comprehensive utilization and development prospect of *Camellia oleifolia* [J]. China Rural Science & Technology, 2006(10):21-23. (in Chinese)
- [3] 马力,钟海雁,陈永忠,等. 油茶果采后处理对油茶籽内在品质的影响研究[J]. 中国粮油学报,2014,29(12):73-76.
MA Li, ZHONG Haiyan, CHEN Yongzhong, et al. The effect of post-harvest treatment of camellia fruit on quality of camellia seed [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(12):73-76. (in Chinese)
- [4] 谢为俊,丁冶春,王凤贺,等. 基于卷积神经网络的油茶籽完整性识别方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7):13-21.
XIE Weijun, DING Yechun, WANG Fenghe, et al. Integrity recognition of *Camellia oleifera* seeds based on convolutional neural network [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):13-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.002. (in Chinese)
- [5] 王亚萍,费学谦,王开良,等. 油茶果采后处理方式对油茶籽油品质的影响[J]. 中国油脂,2013,38(9):14-16.
WANG Yaping, FEI Xueqian, WANG Kailiang, et al. Effects of treatments of *Camellia oleifera* fruits on the quality of oil-tea camellia seed oil [J]. China Oils and Fats, 2013, 38(9):14-16. (in Chinese)
- [6] XIE Weijun, CHEN Pengxiao, WANG Fenghe, et al. Dielectric properties of *Camellia oleifera* seed kernels related to microwave and radio frequency drying [J]. International Food Research Journal, 2019, 26(5):1577-1585.
- [7] 朱广飞,任嘉嘉,王振,等. 油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J]. 农业工程学报,2016,32(7):19-27.
ZHU Guangfei, REN Jiajia, WANG Zhen, et al. Design of shelling machine for *Camellia oleifera* fruit and operating parameter optimization [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7):19-27. (in Chinese)
- [8] 曲振兴,樊涛,张世才,等. 油茶果脱壳分选设备研究现状分析[J]. 林业机械与木工设备,2017,45(11):4-7.
QU Zhenxing, FAN Tao, ZHANG Shicai, et al. Analysis of research status of camellia fruit peeling and separating equipment [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2017, 45(11):4-7. (in Chinese)
- [9] 汤晶宇,吴昊,徐克生,等. 油茶果壳籽清选技术装备研究分析[J]. 林业机械与木工设备,2019,47(7):4-10.
TANG Jingyu, WU Hao, XU Kesheng, et al. *Camellia Oleifera* shells and seeds cleaning technical equipment research and analysis [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019, 47(7):4-10. (in Chinese)
- [10] 李立君,胡文字,高自成,等. 曲柄摇杆振动破壳油茶果粗选机运动学分析及试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):28-35.
LI Lijun, HU Wenyu, GAO Zicheng, et al. Kinematics analysis and experiment of crank rocker vibrating coarse sorting machine for unshelled oil-tea fruit [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7):28-35. (in Chinese)
- [11] JIANG Hongzhe, WANG Wei, WANG Bo, et al. Design and experimental research of shelling and sorting machine for fresh *Camellia oleifera* fruit based on physical properties [C] // ASABE Meeting, 2018:1800815.
- [12] 黄凤洪,李文林,夏伏建,等. 油菜籽脱壳机的研制与应用[J]. 农业工程学报,2006,22(11):147-151.
HUANG Fenghong, LI Wenlin, XIA Fujian, et al. Research and application of dehulling machine for camellia oleosa seed [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11):147-151. (in Chinese)
- [13] 蓝峰,崔勇,苏子昊,等. 油茶果脱壳清选机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(15):33-39.
LAN Feng, CUI Yong, SU Zihao, et al. Design and test on shelling and sorting machine of *Camellia oleifera* fruit [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15):33-39. (in Chinese)
- [14] 周敬东,黄云朋,李敏慧,等. 一种基于 CCD 相机的通道式油茶果色选机系统[J]. 中国农机化学报,2015,36(5):128-133.
ZHOU Jingdong, HUANG Yunpeng, LI Minhui, et al. Channel color sorter of *Camellia oleifera* fruit based on CCD camera [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5):128-133. (in Chinese)
- [15] ZHU Guangfei, LIU Hai, XIE Yucen, et al. Postharvest processing and storage methods for *Camellia oleifera* seeds [J]. Food Reviews International, 2019, 36(4):319-339.
- [16] 吴雪林. 基于脉动能量强化振动分选床中颗粒分离机制和数值模拟[D]. 北京:中国矿业大学,2017.
WU Xuelin. Research on separation mechanism and numerical simulation of particle with pulsing energy enhanced vibration separation bed [D]. Beijing: China Mining University, 2017. (in Chinese)
- [17] 孔祥希,邢金昕,闻邦椿. 直线振动输送机物料运动状态分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(6):827-831.
KONG Xiangxi, XING Jinxin, WEN Bangchun. Analysis of motion the part on the linear vibratory conveyor [J]. Journal of

- Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(6): 827 – 831. (in Chinese)
- [18] 于晓东. 小于 6 mm 细粒煤复合式干法分选特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
YU Xiaodong. Research on the separation characteristics of 6 mm fine coal in a compound dry separator[D]. Beijing: China Mining University, 2017. (in Chinese)
- [19] 邓成江, 赵银, 赵云飞, 等. 单振动电机激振的振动松散机振动体动力学分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 90 – 93.
DENG Chengjiang, ZHAO Yin, ZHAO Yunfei, et al. Analysis of dynamics for vibrating body of vibrating loose machine excited by single vibrating motor[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 90 – 93. (in Chinese)
- [20] HONAKER R Q, SINGH N, GOVINDARAJAN B. Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(4): 415 – 427.
- [21] GUO C Z, CHEN H, YUAN Q X, et al. The research of *Camellia oleifera* seed winnowing peel test[J]. Advanced Materials Research, 2011, 228 – 229: 737 – 743.
- [22] 李建平, 赵匀. 物料在振动筛面上抛起的计算机模拟和实验研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 51 – 53.
LI Jianping, ZHAO Yun. Experiment and computer simulation of tossing motion of agricultural materials on oscillating sieve [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 51 – 53. (in Chinese)
- [23] WANG Fenghe, DING Yechun, XIE Weijun, et al. Design and experimental study of a separating machine for seed and peel of *Camellia oleifera* fruit[J]. IFAC – Papers OnLine, 2019, 52(30): 87 – 91.
- [24] 王博. 油茶果壳籽分离方法与设备研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
WANG Bo. The research on method and equipment of shell-seed separation for *Camellia oleifera* [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [25] 饶洪辉, 黄登昇, 王玉龙, 等. 液压驱动式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 133 – 139, 147.
RAO Honghui, HUANG Dengsheng, WANG Yulong, et al. Design and experiment of hydraulic-driven camellia fruit picking machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 133 – 139, 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190515&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 05. 015. (in Chinese)
- [26] 鲁东, 杨宛章. 横向倾斜输送带式啤酒花分选机的设计[J]. 新疆农机化, 2009(6): 20 – 21.
LU Dong, YANG Wanzhang. Design of a horizontal inclined conveyor belt separating machine for beer flower[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2009(6): 20 – 21. (in Chinese)
- [27] 余淑华, 刘艳丽, 王世璞, 等. 脱绒棉种色选机双 CCD 检测系统设计与仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 55 – 61.
YU Shuhua, LIU Yanli, WANG Shipu, et al. Design and simulation analysis of dual CCD detection system for delinted cottonseeds color sorter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 55 – 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150908&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 008. (in Chinese)
- [28] 刘声泉. 基于线阵 CCD 的光电色选机图像采集与控制系统设计[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
LIU Shengquan. Design of image acquisition and control system of photoelectric sorter based on linear CCD[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [29] 余淑华, 刘艳丽, 王世璞, 等. 基于 FPGA 的脱绒棉种色选机实现[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 20 – 26.
YU Shuhua, LIU Yanli, WANG Shipu, et al. Implementation of delinted cottonseeds color sorter based on FPGA [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 20 – 26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150804&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 08. 004. (in Chinese)
- [30] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 1 – 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 1 – 10. (in Chinese)