

基于 EDEM 的变间距式鲜枸杞分级机设计

于洋¹,任思敏¹,魏雅鑫¹,魏梦迪¹,胡定贤¹,陈廷敏²

(1.西安科技大学机械工程学院,陕西西安710054;2.宁夏链杞智汇科技有限公司,宁夏石嘴山753400)

摘要:针对鲜枸杞分级难度高的问题,设计了一种变间距式鲜枸杞分级机,探索其最佳工作参数组合。运用运动结构多视角图像重建技术获取鲜枸杞模型,建立了与实体相似度较高的枸杞模型。利用 EDEM 软件对不同进料量、分级皮带直径、运行速度及筛面长度进行单因素仿真分析,明确了各个参数对分级效果的影响规律。运用 Design-Expert 10.0.1 软件设计多因素正交旋转仿真试验并对试验结果进行方差分析和参数优化,仿真试验结果表明:当鲜枸杞的进料量为 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、皮带直径为 21 mm、运行速度为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,分级精度为 96.82%、伤果率为 2.09%,加工分级机样机,根据优化所得参数组合进行 5 组重复分级试验,可得鲜枸杞平均分级精度和伤果率分别为 96.37% 和 2.23%,仿真结果与现场实验拟合度高,满足鲜枸杞分级的作业要求。本文可为其他长卵形果蔬的分级机的设计和优化提供参考。

关键词:鲜枸杞;分级机;变间距式;参数优化;EDEM

中图分类号:S226.5 **文献标志码:**A

Design of variable-spacing fresh wolfberry grading machine based on EDEM

YU Yang¹, REN Simin¹, WEI Yaxin¹, WEI Mengdi¹, HU Dingxian¹, CHEN Tingmin²

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Ningxia LianqiZhihui Technology Limited Company, Shizuishan, Ningxia 753400, China)

Abstract: Mature fresh wolfberries are characterized by thin skin and tender flesh, short storage time, and susceptibility to damage, so it is difficult to grade fresh wolfberry. To solve this problem, a variable-spacing type fresh wolfberry grading machine was designed according to the horizontal diameter size of fresh wolfberry. A structure from motion coupled with clustering views for multi-view stereo technology was used to obtain a model of the fresh wolfberry, and a model of the wolfberry with a high degree of physical similarity was established. EDEM software was used to simulate and analyze different feeding volumes, grading belt diameters, running speeds, and screen lengths, and clarify the influence of each parameter on the classification effect. The results of the simulation tests, designed by the Design-Expert 10.0.1 software and subjected to ANOVA and parameter optimization, showed that the grading accuracy was 96.82% and the fruit injury rate was 2.09% for a fresh wolfberry feeding volume of $0.15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, a belt diameter of 21 mm and a running speed of $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Five sets of repeated classification tests were performed on the machine, the average grading accuracy and damage rate of fresh wolfberry were 96.37% and 2.23%. The simulation results fitted well with the field experiments and met the operational requirements for grading fresh wolfberry. This study provides references for the design and optimization of grading machines for other long-oval fruits and vegetables.

Keywords: fresh wolfberry; grading machine; variable-spacing type; parameter optimization; EDEM

枸杞是众所周知的上等养生滋补中药材,具有诸多的医疗保健功效,是我国西北地区重要的农业

富民特色作物之一^[1]。国内果蔬以个头大小分级销售的模式导致了不同规格的果实价格相差数倍,

枸杞子更是如此,对鲜枸杞进行分级的方法可以将小颗粒枸杞果筛选出来制作原浆饮料类,有效提高小果的经济效益。成熟枸杞皮薄肉嫩、水分含量高、储存时间短,所以采摘下来后要尽快投入加工,如果处理不及时,就会导致枸杞腐败,而且枸杞果实脆弱,容易损伤^[2],在处理过程中如果受到撞击或者磕碰会使枸杞在制干后呈黑色而影响商品性状^[3],因此针对鲜枸杞的分级难度较高,目前关于鲜枸杞分级的设备较少,有关鲜枸杞的无损快速分级技术研究亟待开展。

农业领域目前常用的分级机按照工作原理可以分为5大类,即窝眼式、辊轴式、比重式、风力式、视觉识别式。李明智等^[4]设计了一种振动筛网分级装置,同时利用差速排队进行计数,兼具扇贝苗分级与排队计数一体化的需求。吴楠等^[5]针对钙果收获装置作业后含杂率高的问题,设计了一种风筛式筛分装置,在不同风速、振动频率下做了分析,分级精度为96.3%,适用于小体积硬果壳农作物的分级。吕金庆等^[6]以马铃薯直径为标准设计了一种辊式马铃薯分级机,通过差动分级装置改变提升角控制分级范围,马铃薯在两辊所形成的间隙中旋转前进。装置的生产率和分级精度均较高,广泛应用于薯类作物的分级。童威^[7]设计了一种大蒜的质量组合筛选机,采用称重传感器完成大蒜的快速称重,按照质量对大蒜精确组合筛选,分级精度为98%,完成一次筛选的时间约为6 s。马本学等^[8]运用残差网络和图像处理技术对干制哈密大枣进行外观质量检测,尺寸检测的准确率为93.75%。上述研究成果可以满足目前大部分农作物果实的分级要求,但若应用于鲜枸杞分级暂不能同时满足伤果率、分级精度、生产率的要求,针对这个问题,本文设计了一种伤果率较低、分级精度和生产率较高的变间

距式鲜枸杞分级机,对其工作过程运用 EDEM 软件进行仿真模拟,通过对试验结果的分析 and 多目标寻优求解确定最佳工作参数,并进行现场分级实验。

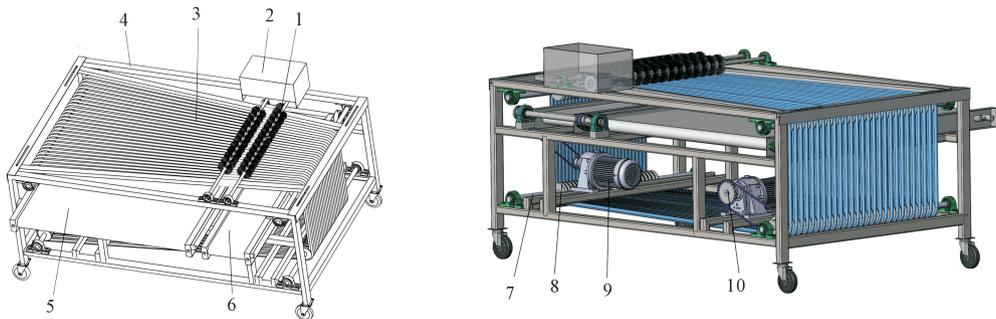
1 装置结构与工作原理

变间距式鲜枸杞分级机由筛分单元、定向单元、出料单元三部分组成,整体结构如图1所示。筛分单元由分级皮带、皮带导槽、皮带轮、传动轴、挡圈、机架、电机等组成。其中,用于分级的皮带是分级机的关键零部件之一,设计其截面形状似伞形,上半部分为半圆形,与枸杞直接接触,下半部分为正方形,在皮带导槽中滑动。分级皮带材质为硅胶,无芯体,可以自由弯曲驱动^[9]。定向单元由两排毛刷、电机、链轮等部分组成,鲜枸杞经过定向单元可以自动摆正,纵径与分级皮带运行方向平行。出料单元由两段带式输送机组成,带式输送机平稳出料可以降低对枸杞的冲击。机架前后分别安装有功率为0.75 kW和1 kW的三相异步电动机,分别为出料单元和筛分单元提供驱动力。

查阅文献^[10]结合各种类型鲜枸杞的尺寸测量结果,设定分级机的皮带间隙范围为5~20 mm。工作时,传动轴和皮带轮在链传动装置带动下同步运转,分级皮带向前传动,鲜枸杞进入筛分单元之后随分级皮带一起向前运动,两者之间无相对运动,皮带间隙尺寸由5 mm逐渐扩大到20 mm,枸杞横径小于间隙尺寸即可落下,通过出料单元的带式输送机落入这一级的下料框中,最终根据鲜枸杞横径大小将其分为若干等级。

2 分级过程仿真

评价鲜枸杞分级机工作性能的指标为分级精度和伤果率,设计时力求合格粒度的物料经过分级



1.用于定向的毛刷;2.定向单元的驱动装置;3.分级皮带;4.机架;5.用于大果出料的带式输送机;6.用于小果出料的带式输送机;
7.传动轴;8.皮带轮;9.出料单元的驱动电机;10.筛分单元的驱动电机

1. Directional brush; 2. Drive device for directional unit; 3. Grading belt; 4. Frame; 5. Belt conveyor for large fruits discharge;
6. Belt conveyor for small fruits discharge; 7. Drive shaft; 8. Belt pulley; 9. Drive motor for discharge unit; 10. Drive motor for screening unit

图1 变间距式鲜枸杞分级机整体结构

Fig.1 Structure of variable-spacing type fresh wolfberry grading machine

机能 100% 从混合原料中分离出来,且具有较大的生产率,但又不希望装置伤果率高。根据变间距式鲜枸杞分级机的结构特点,主要有 4 个因素可能影响实际分级效果,即进料量、分级皮带直径、运行速度以及筛面长度。利用 EDEM 软件对分级过程进行仿真,明确影响分级精度和伤果率的关键参数,为装置样机的优化设计提供依据。

2.1 等效鲜枸杞模型建立

为准确建立鲜枸杞的三维模型,需要对其物理参数进行测定。2021 年 7 月 18 日上午在宁夏回族自治区平罗县枸杞种植基地(38°45'N,106°46'E)随机采摘 100 粒成熟鲜枸杞,品种为‘宁杞 5 号’,利用游标卡尺(型号:Links,量程:0~200 mm,精度 0.02 mm)测量其横径和纵径,用高精度电子秤(型号:100G,量程:0~100 g,精度:0.001 g)测量鲜枸杞的质量并间接计算出枸杞的密度,测得 100 组数据并取其均值,可得到横径和纵径分别为 9.35 mm 和 18.57 mm,单粒质量为 0.73 g,密度为 689 kg·m⁻³。

鲜枸杞的外形是不规则体,常规建模方法无法精确还原其真实特征^[11]。为准确建立鲜枸杞的三维模型,提高仿真试验的真实性,运用运动结构的多视角图像重建(structure from motion coupled with clustering views for multi-view stereo,SFM-CMVS)技术获取鲜枸杞的模型^[12]。图 2a(见 271 页)所示为鲜枸杞颗粒,选取纵横径均接近平均值的 1 颗鲜枸杞为对象,用工业相机拍摄 128 张二维图片,导入 Visual SFM 软件获取枸杞的稠密点云模型。使用 MeshLab 点云滤波器工具去除点云文件噪声点和冗余点并对鲜枸杞轮廓区域进行提取,得到去噪滤波后的点云,如图 2b(见 271 页)所示。通过对点云数据进行曲面拟合得到鲜枸杞的实体模型,如图 2c(见 271 页)所示,将实体模型导入有限元软件 ANSYS 中划分网格,如图 2d(见 271 页)所示,最后将网格导入离散元软件 EDEM 前处理的颗粒建模模块中,利用多个球形单元交叠在一起构成颗粒簇的建模方法^[13]得到所需要的鲜枸杞模型,如图 2e(见 271 页)所示。实体模型与图像相似度高,表明本文方法是有效的,通过点云数据绘制的实体较为完整地保留了枸杞的整体特征。

2.2 分级机几何模型建立

为了提高计算速度,对分级机进行结构简化,将其简化为入料输送带、滑道、定向毛刷、分级皮带、出料输送带五部分,几何模型如图 3(见 271 页)所示。在入料输送带上部设置颗粒工厂,使其根据体积按照正态分布生成五种不同横径的枸杞颗粒,分别

为 6、9、12、15、18 mm。在 EDEM 软件中设置枸杞与输送带之间的接触模型为 Moving Plan 模型,枸杞与枸杞的接触模型为 Liner Spring 模型,枸杞与其他部件的接触模型为 Hertz-Mindlin 无滑动模型^[14],几何模型与鲜枸杞材料参数和接触参数^[15]如表 1 所示。

在 EDEM 软件 Creator 模块中对模型进行运动设置,为每根分级皮带添加 Conveyor Translation 运动,对定向毛刷添加 Linear Rotation Kinematic 运动,使其以 30 r·min⁻¹ 的转速旋转。在 Simulator 模块中设置瑞利时间步长为 20%,每组仿真时间设置为 30 s,数据写出时间步长设置为 0.005 s,网格单元尺寸设置为最小颗粒半径的 2 倍。

2.3 分级过程仿真

通过预实验确定各因素取值范围:进料量 Q 为 0.1~0.35 kg·s⁻¹、分级皮带直径 d 为 5~30 mm、运行速度 v 为 0.05~0.45 m·s⁻¹、筛面长度 L 为 1 000~3 500 mm。仿真开始后,混合粒度的鲜枸杞颗粒群从颗粒工厂生成,通过滑道进入筛面后与分级皮带一起向前传动,不同粒度的颗粒穿过筛面落入不同级别的质量传感器监测区间,图 4(见 271 页)所示为 8.0 s 分级情况,不同颜色代表不同粒度的枸杞。

2.4 单因素仿真试验分析

鲜枸杞分级的两个评价指标:分级精度 y_1 、伤果率 y_2 分别定义为^[16-17]:

$$y_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{n_2}{N_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, N 为颗粒工厂生成鲜枸杞总质量(kg); N_1 为颗粒工厂生成鲜枸杞总数(粒); n_1 为分级后各级符合规格的鲜枸杞总质量(kg); n_2 为分级后损伤的鲜枸杞总数(粒)。

仿真结束后,通过 EDEM 软件 Analyst 模块中的质量传感器统计各级枸杞应落下量与实际落下量,

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

材料 Materials	枸杞 Wolfberry	硅胶皮带 Silicone belt	毛刷(PA6) Brush (PA6)
泊松比 Poisson's ratio	0.2	0.48	0.34
剪切模量 Shear modulus/MPa	190	1200	977
密度 Density/(kg·m ⁻³)	689	1230	1120
碰撞恢复系数(与枸杞) Collision recovery factor (with wolfberry)	0.2	0.4	0.3
静摩擦系数(与枸杞) Static friction coefficient (with wolfberry)	0.3	0.5	0.4
动摩擦系数(与枸杞) Dynamic friction coefficient (with wolfberry)	0.04	0.05	0.07

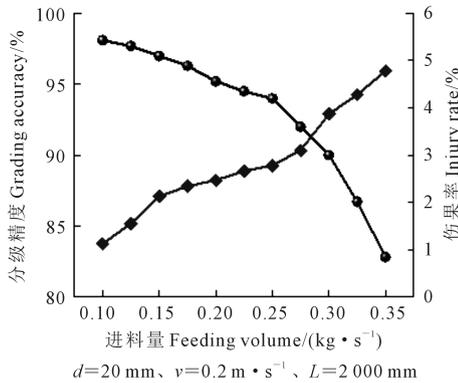
进而依据式(1)计算出装置总的分级精度。在 Histogram 模块中将 X 轴设置为 Total Force, Y 轴设置为 Number of Particles, 得到全部颗粒的碰撞力分布数据, 根据鲜枸杞果实机械损伤评价标准确定 4.8 N 为鲜枸杞发生轻度损伤的临界压力值^[18], 以此为判定标准根据式(2)计算出各组仿真的伤果率。

图 5a 所示为进料量对鲜枸杞分级精度、伤果率的影响规律。由图可知, 随着进料量的增大, 鲜枸杞分级精度呈减小趋势, 伤果率呈增大趋势。当进料量在 0.1~0.25 kg·s⁻¹ 时, 随着进料量的增大, 伤果率呈缓慢上升趋势, 分级精度呈缓慢下降趋势。当进料量大于 0.25 kg·s⁻¹ 时, 鲜枸杞拥堵结堆, 伤果率随进料量的增大呈明显上升趋势, 同时分级精度随进料量增大呈明显下降趋势。进料量低于 0.15 kg·s⁻¹ 时, 分级机生产率较低, 综合考虑, 选取枸杞进料量范围为 0.15~0.25 kg·s⁻¹。图 5b 所示为分级皮带直径对鲜枸杞分级精度、伤果率的影响规律。由图可知, 随着皮带直径增大, 鲜枸杞伤果率整体呈减小趋势, 分级精度呈先增大后减小趋势。

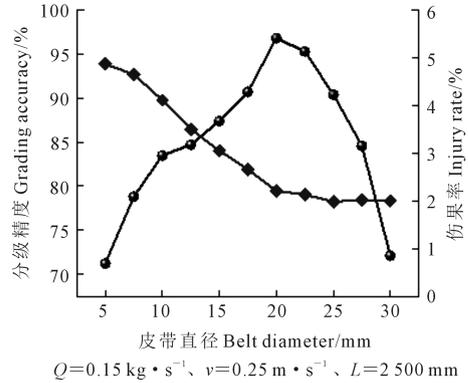
当皮带直径在 5~20 mm 时, 伤果率随皮带直径的增大呈明显下降趋势, 分级精度呈明显上升趋势。当皮带直径大于 20 mm 时, 分级精度呈明显下降趋势, 因此, 选取分级皮带直径范围为 15~25 mm。图 5c 所示为皮带运行速度对鲜枸杞分级精度、伤果率的影响规律。由图可知, 随着运行速度的增大, 鲜枸杞分级精度呈先增大后减小的趋势, 伤果率呈先减小后增大的趋势。当皮带运行速度在 0.2~0.3 m·s⁻¹ 时, 鲜枸杞分级精度和伤果率均达到峰值, 因此, 选取皮带运行速度范围为 0.2~0.3 m·s⁻¹。随着筛面长度的增大, 分级精度和损伤率均无明显变化, 如图 5d 所示, 因此确定进料量、分级皮带直径以及运行速度为分级效果的主要因素, 为了进一步确定最优参数, 设计正交旋转多因素仿真试验。

3 多因素正交旋转仿真试验

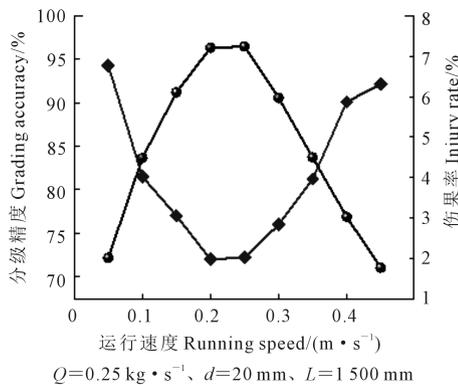
单因素实验中已经对关键参数进行了初步优选, 为了进一步确定各参数最优值, 利用 Design-Expert 10.0.1 软件设计多因素正交旋转组合试验。



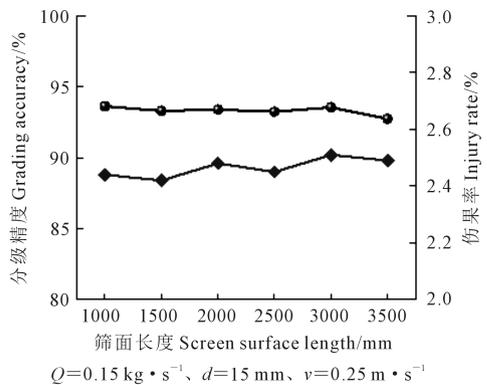
(a) 进料量对分级效果的影响
Effect of feeding volume on grading effectiveness



(b) 皮带直径对分级效果的影响
Effect of belt diameter on grading effectiveness



(c) 运行速度对分级效果的影响
Effect of running speed on grading effectiveness



(d) 筛面长度对分级效果的影响
Effect of screen surface length on grading effectiveness

—●— 分级精度 Grading accuracy —◆— 伤果率 Injury rate

图 5 EDEM 软件仿真结果

Fig.5 EDEM simulation results

3.1 试验的因素选择

根据初步的仿真分析确定的参数范围进行三因素三水平正交试验,试验因素编码表如表 2 所示。

3.2 结果分析

设进料量 A 、皮带直径 B 、运行速度 C 、分级精度 y_1 、伤果率 y_2 ,试验方案与结果如表 3 所示。利用 Design-Expert 10.0.1 软件对试验结果进行方差分析,并进行多元回归拟合,得到分级精度 y_1 和伤果率 y_2 的回归方程,最后对模型进行显著性检验^[19]。

3.2.1 方差分析 通过对试验数据的分析和拟合,分级精度 y_1 回归模型方差分析如表 4 所示。 y_1 回归模型组间差异显著性检验 $P < 0.0001$,失拟项 $P = 0.3697$,决定系数 $R^2 = 0.9840$,回归模型显著,失拟项不显著,决定系数接近于 1,表明 y_1 回归模型拟合度好。 y_1 回归模型的精确度为 19.326,变异系数 0.47%,表明该试验数据可靠^[20-22],可以很好的预测分级精度。由表 4 可知,对于试验指标分级精度, A 、 B 、 B^2 影响极显著, C 影响显著,影响显著性由大到小为:进料量>皮带直径>运行速度。试验指标和试验因素存在显著的二次关系,进料量 A 、皮带直径 B 、运行速度 C 三个因素对分级精度 y_1 影响的回归方程为:

$$y_1 = 96.44 - 0.74A + 0.73B + 0.44C + 0.36AB + 0.52AC - 0.087BC + 0.06A^2 - 4.14B^2 - 0.2C^2 \quad (3)$$

表 2 试验因素编码

Table 2 Coding of test factors

编码 Code	因素 Factor		
	进料量/(kg·s ⁻¹) Feeding volume	皮带直径/mm Belt diameter	运行速度/(m·s ⁻¹) Running speed
-1	0.15	15	0.2
0	0.2	20	0.25
1	0.25	25	0.3

表 3 试验方案与结果

Table 3 Test design and results

试验序号 Test No.	A	B	C	$y_1/\%$	$y_2/\%$
1	-1	1	0	93.25	1.91
2	0	-1	-1	90.96	2.35
3	-1	-1	0	92.81	2.39
4	0	1	1	93.06	2.52
5	0	0	0	96.64	2.43
6	1	1	0	92.52	2.08
7	0	1	-1	92.88	1.83
8	0	0	0	95.73	2.24
9	0	0	0	96.42	2.46
10	1	0	-1	94.28	2.78
11	-1	0	-1	96.82	2.25
12	0	-1	1	91.49	3.12
13	1	0	1	96.71	3.16
14	0	0	0	96.68	2.37
15	0	0	0	96.72	2.41
16	1	-1	0	90.63	2.44
17	-1	0	1	97.17	2.87

伤果率 y_2 方差分析过程与分级精度 y_1 类似,各因素对伤果率影响显著性由大到小为:运行速度>皮带直径>进料量,进料量 A 、皮带直径 B 、运行速度 C 三个因素对伤果率 y_2 影响的回归方程为:

$$y_2 = 2.41 + 0.33A - 0.7B + 0.18C - 0.058AB - 0.14AC - 0.12BC + 0.32A^2 - 0.11B^2 + 0.37C^2 \quad (4)$$

通过方差分析结果可知 3 个参数均是影响分级精度和伤果率的主要因素。分级机运行速度越快,进料量越大,越易造成拥堵,导致枸杞与毛刷碰撞时的冲击增大,出现刷伤、挤伤等现象,造成装置伤果率增加;反之,伤果率将降低,但同时也导致生产率下降。在分级过程中,分级皮带直径较小时,皮带表面积减小,枸杞不易划入皮带间隙中,其次鲜枸杞纵径尺寸约是横径的 2 倍,进一步导致枸杞在筛面上的位置杂乱无章,增加了枸杞与毛刷的接触概率;分级皮带直径较大时,皮带间隙中两层甚至多层枸杞重叠,位于上方的枸杞随着下层枸杞向前运动直接落下到出料输送带上,严重影响分级精度。

3.2.2 参数优化 为得到最佳的试验因素水平组合,利用 Design-Expert 10.0.1 软件中的优化模块对回归模型进行求解,根据鲜枸杞分级机作业的实际工作条件、作业性能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件为:

$$\begin{cases} \max y_1(A, B, C) \\ \min y_2(A, B, C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0.15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \leq A \leq 0.25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \\ 15 \text{ mm} \leq B \leq 25 \text{ mm} \\ 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq C \leq 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

表 4 分级精度回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance in regression model of grading accuracy

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	84.95	9	9.44	47.69	<0.0001 **
A	4.37	1	4.37	22.06	0.0022 **
B	4.23	1	4.23	21.39	0.0024 **
C	1.52	1	1.52	7.69	0.0275 *
AB	0.53	1	0.53	2.66	0.1472
AC	1.08	1	1.08	5.47	0.0520
BC	0.031	1	0.031	0.15	0.7057
A^2	0.0002	1	0.0002	0.0008	0.9787
B^2	72.22	1	72.22	364.93	<0.0001 **
C^2	0.17	1	0.17	0.84	0.3892
残差 Residual	1.39	7	0.20		
失拟 Lack of fit	0.7	3	0.23	1.38	0.3697
纯误差 Pure error	0.68	4	0.17		

注: ** 表示影响极显著($P < 0.01$), * 表示影响显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

Note: ** indicates a highly significant effect ($P < 0.01$), * indicates a significant effect ($0.01 \leq P < 0.05$).

通过优化求解,得到鲜枸杞的进料量为 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、分级皮带直径为 21 mm 、运行速度为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,鲜枸杞分级机的分级效果最好,分级精度为 96.82% ,伤果率为 2.09% 。

4 分级机样机实验

4.1 实验器材

自制变间距式鲜枸杞分级机进行现场实验,实验地点为宁夏链杞智汇科技有限公司,实验对象为成熟‘宁杞5号’鲜枸杞,实验器材包括:变间距式鲜枸杞分级机1台、游标卡尺若干、秒表1个、电子秤1台。样机可根据鲜枸杞横径将其分为 $0\sim 7$ 、 $7\sim$

14 、 $14\sim 20$ 、 $>20 \text{ mm}$ 四个等级,样机如图6所示。

4.2 实验方法

实验之前在枸杞种植基地随机采摘 100 kg 鲜枸杞,经清洗、风干、检查无损伤之后准备实验。进行实验前预先调整好各项参数,装置运行稳定后开始进料,实验采用连续进料方式,通过变频器控制入料输送机的电机转速来调节鲜枸杞的进料量^[23],待鲜枸杞到达筛分单元时开始计时, 30 s 后关闭电机,实验过程如图7a所示。收集分级后的枸杞果实进行人工测量并计算分级精度,测量完毕后将鲜枸杞投入真空干燥机,通过观察制干后的颜色来判断损伤程度,进而计算出伤果率,制干过程如图7b所示。

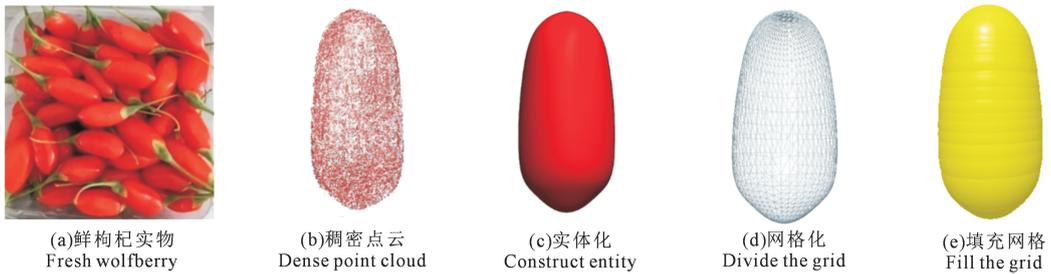
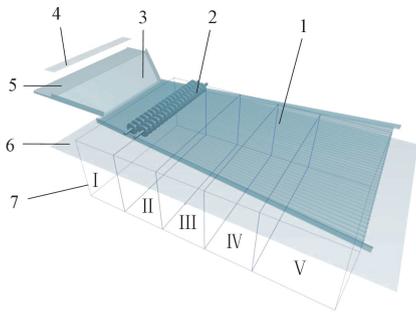


图2 鲜枸杞仿真颗粒建立过程

Fig.2 Fresh wolfberry simulation particle establishment process



1.分级皮带;2. 定向毛刷;3. 滑道;4. 颗粒工厂;

5. 入料输送带;6. 出料输送带;7. 五个质量传感器

1. Grading belt;2. Directional brush;3. Slipway;4. Particles factory;

5. Infeed conveyor belt;6. Discharge conveyor belt;7. Five mass sensors

图3 分级机几何模型

Fig.3 Geometric model of the grading machine

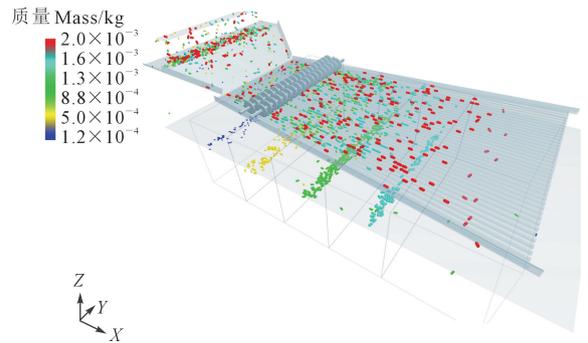


图4 8.0 s 分级情况

Fig.4 Grading status at 8.0 s

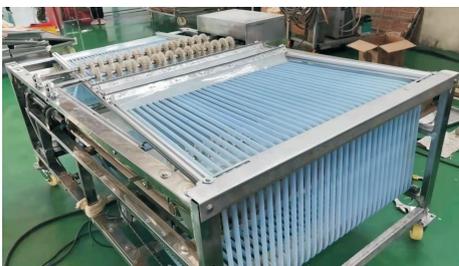


图6 变间距式鲜枸杞分级机样机

Fig.6 A variable-spacing type fresh wolfberry grading machine prototype



(a) 实验过程 Test process



(b) 制干过程 Drying process

图7 实验及制干过程

Fig.7 Test and drying process

4.3 实验结果

根据所得优化参数组合进行 5 组重复现场实验,得到鲜枸杞平均分级精度、伤果率分别为 96.37%、2.23%,实验结果如图 8 所示。实验结果与优化所得结果相比,相对误差分别为 0.45%、0.14%,误差主要是在现场实验中鲜枸杞的进料量不能精准把控引起的。

参考行业标准 JB/T 12443—2015《滚杠式干果分级机》规定的分级机的混级率 $\leq 10\%$,伤果率 $\leq 3\%$,表明变间距式鲜枸杞分级机的分级效果符合生产要求。

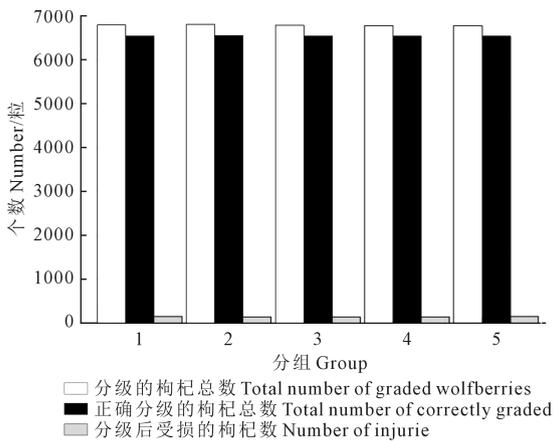


图 8 现场实验结果

Fig.8 Field experimental results

5 结论

1) 运用 EDEM 软件对不同进料量、分级皮带直径、运行速度及筛面长度 4 个因素进行单因素仿真试验,分析各因素对分级精度和伤果率的影响规律,确定进料量、分级皮带直径以及运行速度为分级效果的主要影响因素。以提高枸杞分级精度、降低伤果率为目标,确定各参数优选结果周边范围为枸杞进料量 $0.15 \sim 0.25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、分级皮带直径 $15 \sim 25 \text{ mm}$ 、皮带运行速度 $0.2 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2) 为了进一步确定最优参数,设计多因素正交旋转组合试验,运用 Design-Expert 10.0.1 软件进行数据分析和多目标寻优求解,确定最优参数组合为进料量为 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、分级皮带直径为 21 mm 、运行速度为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,分级精度为 96.82%,伤果率为 2.09%。

3) 利用自制的变间距式鲜枸杞分级机进行分级实验,对比仿真结果和实验结果,分级机分级精

度、伤果率误差分别为 0.45%、0.14%,虽数值上稍有偏差,但在误差允许范围内。

参考文献:

- [1] 马鹏生,朱溶月,白长财,等.宁夏枸杞植物资源及产业发展调查[J].中成药,2021,43(11):3245-3248.
MA P S, ZHU R Y, BAI C C, et al. Investigation on plant resources and industrial development of wolfberry in Ningxia[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2021, 43(11): 3245-3248.
- [2] 糟绍英,黄婷,秦星,等.不同品种(系)枸杞鲜果耐储性研究[J].宁夏农林科技,2018,59(6):17-18,21.
ZAO S Y, HUANG T, QIN K, et al. Study on storability of different wolfberry fresh fruit strains[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, 59(6): 17-18, 21.
- [3] 张最.振动式枸杞采摘机构的设计与试验[D].北京:中国农业科学院,2016.
ZHANG Z. The design and experiment of *Lycium barbarum* harvesting mechanism by vibration mode[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [4] 李明智,张光发,于功志,等.扇贝苗分级计数装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(21):93-101.
LI M Z, ZHANG G F, YU G Z, et al. Design and experiment of grading and counting device for scallop seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 93-101.
- [5] 吴楠,贺俊林,刘少华,等.基于 EDEM-Fluent 耦合的钙果风筛式清选装置仿真与试验[J].农业工程,2021,11(1):82-87.
WU N, HE J L, LIU S H, et al. Simulation and experiment of air screen cleaning device for *Cerasus humilis* based on EDEM-Fluent coupling[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(1): 82-87.
- [6] 吕金庆,于佳钰,冯雪,等.辊式马铃薯分级机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):323-332.
LYU J Q, YU J Y, FENG X, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323-332.
- [7] 童威.大蒜定量组合筛选机的设计与试验[D].杭州:浙江理工大学,2021.
TONG W. Design and experiment of garlic quantitative combination screening machine[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021.
- [8] 马本学,李聪,李玉洁,等.基于残差网络和图像处理的干制哈密大枣外部品质检测[J].农业机械学报,2021,52(11):358-366.
MA B X, LI C, LI Y J, et al. Detection method for external quality of dried Hami jujube based on residual network combined with image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 358-366.
- [9] 于洋,任思敏,刘家强,等.一种鲜枸杞粒度大小筛选系统及方法;CN202011126885.1[P].2021-02-05.
YU Y, REN S M, LIU J Q, et al. A system and method for screening the particle size of fresh wolfberry;CN202011126885.1[P]. 2021-02-05.
- [10] 李乐凯.基于振动式采摘的枸杞植株生物力学关键特性研究[D].银川:宁夏大学,2020.

- LI L K. Research on the biomechanical characteristic of wolfberry plant based on the vibrating harvesting[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [11] 郝建军,魏文波,黄鹏程,等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36-44.
- HAO J J, WEI W B, HUANG P C, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 36-44.
- [12] 杨广元. 基于多视角枣树模型构建及振动仿真试验研究[D]. 西安:西安科技大学, 2021.
- YANG G Y. Research on jujube tree model construction and vibration simulation experiment based on multi-view[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [13] 柯于仁. 椭圆形颗粒直线振动筛分机机理研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- KE Y R. Research on the mechanism of linear vibrating screening of ellipsoidal particles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [14] 冯岩,孙步功,张克平,等. 基于 EDEM 的油菜播种机仿真试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 288-294.
- FENG Y, SUN B G, ZHANG K P, et al. Simulation test for cole seeding machine based on EDEM[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 288-294.
- [15] 王荣炎,郑志安,徐丽明,等. 枸杞气吸采摘参数试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 165-171.
- WANG R Y, ZHENG Z A, XU L M, et al. Experimental study on air-suction packing parameters of *Lycium barbarum* [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 165-171.
- [16] 张文强,张明明,张俊雄,等. 振摇枸杞采收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 97-102.
- ZHANG W Q, ZHANG M M, ZHANG J X, et al. Design and experiment of vibrating wolfberry harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 97-102.
- [17] 王业成,靳亚东,罗嗣博,等. 集排式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 112-118.
- WANG Y C, JIN Y D, LUO S B, et al. Design and experiment of centralized precision soybean seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 112-118.
- [18] 李萍. 基于振动式采收的枸杞跌落损伤机理及枝条振动特性研究[D]. 银川:宁夏大学, 2021.
- LI P. Research on falling damage mechanism and branch vibration characteristics of *Lycium barbarum* based on vibration harvesting[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [19] 查德翔,吴德胜,李辉,等. 滚筒式堆肥物料筛分机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊1): 434-441, 456.
- CHA D X, WU D S, LI H, et al. Design and experiment of trommel screening machine for composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 434-441, 456.
- [20] 王铁军,王铁良,崔红光,等. 喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 148-158.
- WANG T J, WANG T L, CUI H G, et al. Design and experiment of adjustable feeding straw bale-breaking and rubbing filament machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 148-158.
- [21] WEI J, YANG G Y, YAN H, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021, 28(22): 2360-2369.
- [22] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- GE Y Y. Experimental design method and application of Design-Expert software [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015.
- [23] 李心平,王文哲,赵高源,等. 纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 113-123.
- LI X P, WANG W Z, ZHAO G Y, et al. Design and experiment of longitudinal axial flow double flexible rolling and kneading threshing device for millet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 113-123.