doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.016

基于DEM-MBD耦合的咖啡采摘过程仿真与试验

于英杰[1] 李沛航[1] 赖庆辉[2] 谭 钰[1] 赵庆辉[1] 陈 钰[1]
（1.昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500；2.云南师范大学能源与环境科学学院，昆明 650500）

摘要：针对咖啡机械采摘过程中因作业参数不准确导致采摘质量偏低的问题，利用离散元软件EDEM构建采收期小粒咖啡带果枝条离散元柔性模型，通过对比果实-果柄拉伸分离力和枝条三点弯曲折断力的仿真与试验结果，验证模型设置参数的准确性；采用EDEM-Recurdyn耦合的方法构建小粒咖啡带果枝条与振动式采摘装置互作的离散元模型，通过单因素仿真试验分析小粒咖啡采摘过程中采摘装置的作业参数对采摘质量的影响规律，确定了各作业参数范围。以振频、调幅机构倾角和振动时间为试验因素，采净率、采熟率、枝条损伤率为试验指标，进行三因素五水平的二次回归正交旋转组合仿真试验，结果表明：因素对采净率和采熟率影响由大到小为振频、振动时间和调幅机构倾角，对损伤率影响由大到小为振动时间、振幅和调幅机构倾角，参数优化得到当振频为64 Hz、倾角为40°、振动时间为1.5 s时，采摘效果最佳。在优化作业参数下进行田间采摘试验，得到采净率、采熟率、枝条损伤率平均值分别为92.54%、95.47%和5.01%，与仿真试验结果相对误差分别为4.23%、3.39%、6.37%，验证了仿真试验的可靠性，为咖啡采摘机作业参数研究及结构优化提供理论依据和技术参考。

关键词：小粒咖啡；机械采摘；离散元；多体动力学；耦合仿真；作业参数
中图分类号：S225.93 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0157-11

Simulation and Experiment of Coffea Picking Process Based on DEM-MBD Coupling

YU Yingjie[1] LI Peihang[1] LAI Qinghui[2] TAN Yu[1] ZHAO Qinghui[1] CHEN Yu[1]
(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*
2. *Faculty of Energy and Environmental Sciences, Yunnan Normal University, Kunming* 650500, *China*)

Abstract: In view of the low picking quality caused by inaccurate operating parameters in the mechanical picking process of coffea, the discrete element simulation software EDEM was used to construct the discrete element flexible model of Arabica coffea fruit-bearing branches in harvesting time, the accuracy of the model setup parameters was verified by comparing the simulation and actual test results of fruit-stalk tensile separation force and branch three-point bending fracture force. The EDEM-Recurdyn coupling method was used to construct the simulation model of Arabica coffea fruit-bearing branches interacting with a vibratory picking device, the influence regularity of the operating parameters of the picking device on the picking quality during the picking process was analyzed by means of a single factor simulation test, and the operating parameters value range were defined. The quadratic regression orthogonal rotation combination simulation test of three factors and five levels was carried out with vibration frequency, inclination angle of the amplitude adjustment mechanism and vibration time as the test factors, and picking clean rate, picking ripening rate, and branch damage rate were used as the test indexes. The results showed that the importance of the effect of each factor on each test index in descending order was the vibration frequency, the vibration time and the inclination angle of the amplitude adjustment mechanism. The best picking effect was obtained through parameter optimization when the vibration frequency was 64 Hz, the inclination angle was 40 °, and the vibration time was 1.5 s. The field-picking test was conducted under the optimized operating parameters. The mean values of 92.54%, 95.47% and 5.01% were obtained for the picking clean rate, picking ripening rate and branch damage rate, respectively, and the relative errors with

收稿日期：2024-07-20 修回日期：2024-09-15
基金项目：云南省科技计划项目(202302AE090004-05)和国家自然科学基金项目(52165031)
作者简介：于英杰(1980—)，女，讲师，博士，主要从事高原特色农业技术与装备研究，E-mail: 646677093@qq.com
通信作者：赖庆辉(1980—)，男，教授，主要从事农业机械装备与计算机测控研究，E-mail: laiqinghui007@163.com

the simulation test were 4.23%, 3.39%, and 6.37%, respectively, which verified the reliability of the simulation test, and provided a theoretical basis and technical references for the study of the operating parameters and the optimization of the structure of the coffee picking machine.

Key words: *Coffea arabica* L.; mechanical picking; discrete element; multibody dynamics; coupling simulation; operating parameters

0 引言

小粒咖啡(*Coffea arabica* L.)是茜草科植物,在我国云南普洱、临沧、保山等地广泛种植[1]。因海拔、气候和土壤条件优势,云南咖啡成为全球品质最好的咖啡之一[2]。然而咖啡采摘全部依靠人工,采摘成本占整个咖啡生产成本的60%以上[3]。随着劳动力短缺,采收成本不断增加,机械化采摘是必然趋势。咖啡植株花果同期,采收期枝条上各成熟度果实分布不均,采摘质量对咖啡品质和价值具有重要影响,而采摘机作业参数决定了机械采摘质量。

离散元法(Discrete element method, DEM)在构建农业作物模型、优化农业机械结构、探明作物与机械的相互作用机理等方面具有模型还原度高、仿真结果准确等优点[4-6]。ABHAY等[7]利用离散元法通过粘结接触模型构建球形和核状两种模型来模拟冬小麦碾磨破碎过程,确定了在剪切模量为65MPa和碰撞恢复系数为0.31下球形模型模拟结果更贴近试验结果。COETZEE等[8]使用离散元法对包括主梗、侧梗以及葡萄串果实进行建模,可以指导葡萄去柄装置结构设计。廖宜涛等[9-10]先后采用Hertz-mindlin和Hertz-mindlin with Bonding接触模型构建不同成熟期的饲料油菜茎秆离散元模型,模拟茎秆剪切过程,为饲料油菜收获仿真试验提供了准确模型。王万章等[11]建立了成熟小麦植株的离散元模型,采用EDEM-Recurdyn耦合的方法,模拟小麦在联合收获机中的脱粒过程。结果表明,试验与仿真模拟误差为4.08%。YI等[12]采用EDEM软件建立了直径为3 mm的柑橘果柄模型,利用三点弯曲试验和剪切试验标定bond键中的粘结参数,优化后的柑橘果柄模型能够较好地模拟柑橘果柄弯曲和剪切过程。

咖啡挂果枝条果实间接触特性参数不同,青果、熟果与果柄间连接力不同[13],利用有限元等建模仿真方法很难真实反映咖啡带果枝条特性及采摘过程中枝条和果实的运动响应,而利用离散元法果树建模仿真试验进行果实采摘作业参数研究鲜有报道。本文基于EDEM建立咖啡不同成熟度果实、果柄及枝条的离散元模型,采用Hertz-Mindlin with Bonding接触模型构建咖啡带果枝条柔性模型,通过DEM-MBD耦合仿真试验分析采摘机作业参数,并通过田间试验对模型和仿真作业参数进行验证,以期提高咖啡机械采摘质量。

1 材料与参数测定

1.1 试验材料

选用的试验材料为云南省比较有代表性的优质咖啡品种3年生卡蒂姆品种小粒咖啡(图1)。咖啡树树干(主茎)上分生枝条,枝条上分布节点,节点两侧分生果柄,果柄上随机连接着单果、双果或三果。



图1 卡蒂姆品种小粒咖啡

Fig. 1 Catimor coffea

2022年12月在云南省普洱市咖啡种植示范基地采用五点取样法取10棵果树,得到50株长势一致且无病虫害的挂果枝条作为试验样本,用保鲜膜包裹,如图2所示。依托昆明理工大学现代农业工程学院农业物料实验室在48 h内对样本完成相关测定试验。



图2 试验材料

Fig. 2 Test material

1.2 树形参数测量

使用游标卡尺、卷尺等分别测量青果与熟果三轴尺寸,枝条与果柄直径与长度,并统计枝条节点数和青果与熟果数量。每项参数测量10组,得到10组试验数据后进行统计分析,结果如表1所示。去掉果实和叶片后的咖啡枝条如图3所示。

1.3 果实果柄结合力测定

使用TA-XT PlusC型质构仪测定咖啡熟果和青果与

果柄间的结合力，如图4所示，将果实固定在自制的夹持机构上，刀具夹持果柄并以速度10 mm/min向上运动，直到果实和果柄分离。青果和熟果各取50个样本，重复10次测量后取平均值，得到青果与果柄间结合力为9.42~11.51 N，平均值为10.85 N；熟果与果柄间结合力为5.87~7.72 N，平均值为6.14 N。

表1　挂果枝条物理特性参数

Tab. 1　Physical characterization parameters of fruit-bearing branches

参数	果柄长度/mm	果柄直径/m	枝条长度/mm	枝条直径/m	节点数	青果数	熟果数
范围	2.47~4.25	0.98~2.31	401.23~475.75	4.12~7.53	11~16	9~25	85~104
均值	3.52	1.69	440.25	5.89	13.20	15.70	92.50
标准差	0.32	0.22	10.82	0.51	1.01	0.85	0.97
参数	青果x轴直径/mm	青果y轴直径/mm	青果z轴直径/mm	熟果x轴直径/mm	熟果y轴直径/mm	熟果z轴直径/mm	
范围	10.51~13.05	9.32~12.23	13.22~16.08	12.25~14.50	10.02~13.24	15.18~17.59	
均值	11.97	11.09	14.70	13.32	11.76	16.51	
标准差	0.25	0.38	0.32	0.42	0.48	0.62	

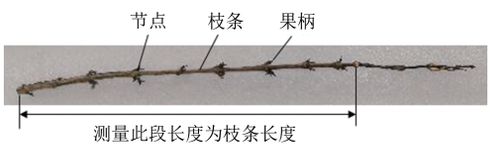


图3　去掉果实和叶片后的咖啡枝条

Fig. 3　Coffea branches with fruits and leaves removed

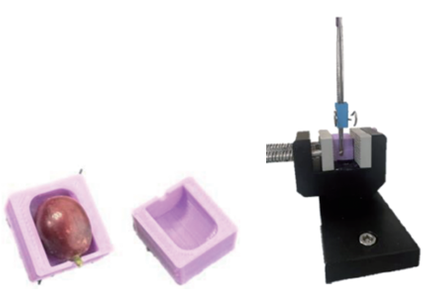


图4　果实果柄结合力测定试验

Fig. 4　Test of fruit stalk binding force

1.4　接触特性参数测定

采用斜面滑动和滚动试验、自由落体碰撞试验方法，测量咖啡果实间的静摩擦因数、滚动摩擦因数和碰撞恢复系数，以及枝条和采摘头材料间的碰撞恢复系数，在EDEM软件中进行离散元仿真试验，对仿真接触参数进行标定。

使用TA-XT PlusC型质构仪、ME204E型电子天平（精度为0.001g）和量筒测量并计算枝条、果柄、青果和熟果密度、弹性模量和泊松比[14]。每项参数测量10组，得到10组试验数据后进行统计分析。结合ABS树脂参数[15]，确定仿真参数如表2所示。

表2　柔性体材料属性参数

Tab. 2　Flexibles material property parameters

参数	青果	熟果	果柄	枝条	采摘头ABS
密度/(g·cm^{-3})	0.75	0.91	0.61	0.74	1.18
弹性模量/MPa	38.70	34.60	832.10	4510.20	200.00
泊松比	0.28	0.24	0.31	0.35	0.39

1.4.1　静摩擦因数与滚动摩擦因数

咖啡采摘过程中，在振动作用下果实之间受到挤压和相对运动，因此咖啡果实间静摩擦因数和滚动摩擦因数对于可靠分析采摘过程中果实受力和运动仿真具有重要影响。

采用斜面法对小粒咖啡熟果间、青果间以及熟果和青果间的静摩擦因数和滚动摩擦因数进行测定[16]。以测定熟果间的摩擦因数为例，将熟果紧密排列并黏贴在纸张表面，制成果实板如图5所示，并固定在升降平台上，将咖啡熟果沿长轴方向置于果实板顶端两果实缝隙间，转动手柄使平台升高，使用高速摄影装置记录咖啡果沿果实板具有下滑趋势或滚动时的斜面角度，测量10次后取平均值。同样方法可以测定青果摩擦因数，测定熟果与青果间摩擦因数时，将青果置于由熟果制成的果实板上进行测量。试验装置如图6所示。



图5　果实板

Fig. 5　Fruit plate



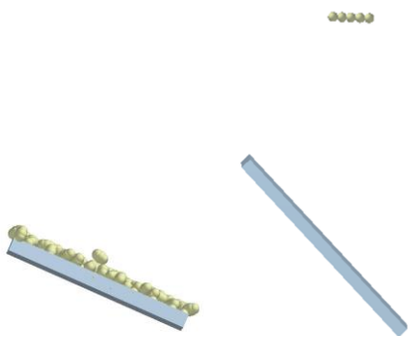
图6　摩擦因数测定试验

Fig. 6　Test of friction coefficients

以斜面倾角为目标参数进行EDEM离散元仿真试验（图7a），通过计算倾角仿真值与实测值的相对误差对摩擦因数仿真参数值进行验证。最后得到小粒咖啡熟果间、青果间以及熟果和青果间的静摩擦因数和滚动摩擦因数如表3所示。

1.4.2　碰撞恢复系数

在咖啡采摘过程中，咖啡枝条受到采摘装置振动作用，与振动头发生高频碰撞，因此测定咖啡枝条与振动头材料之间的碰撞恢复系数是判断咖啡枝条损伤情况的一个重要指标。



（a）摩擦因数 （b）碰撞恢复系数

图7 接触参数测定仿真试验

Fig. 7 Simulation test of contact characteristics parameters

表3 接触参数测定结果

Tab.3 Measurement results of contact characteristics parameters

参数	熟果间	青果间	熟果和青果间
静摩擦因数	0.12	0.17	0.15
滚动摩擦因数	0.008	0.011	0.009
碰撞恢复系数	0.24	0.37	0.31

选用振动头材料为ABS塑料，通过自由落体碰撞试验测定咖啡枝条与ABS塑料之间的碰撞恢复系数，试验装置如图8所示，将咖啡枝条水平夹持在高度$2h$处，在高度h处倾斜45°放置ABS塑料，松开夹持机构，使枝条自由下落与ABS塑料发生碰撞，高速摄影机记录整个试验过程，利用图像处理软件Phantom对采集视频进行后处理，确定咖啡枝条与ABS塑料碰撞后第一次落点的距离L，由$e=L/(2h)$计算出碰撞恢复系数[17]，测量10次后取平均值。

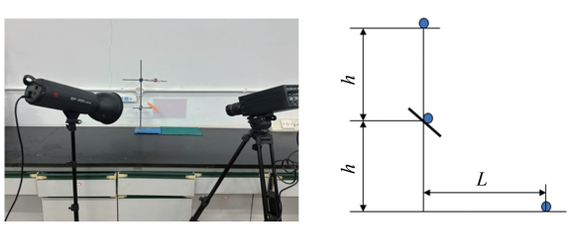


图8 碰撞恢复系数测定试验

Fig. 8 Collision restitution coefficient test

通过EDEM离散元仿真试验（图7b）对碰撞恢复系数仿真参数值进行验证，得到枝条与ABS塑料间的碰撞恢复系数为0.67。在高度h处倾斜45°放置熟果板和青果板，同样方法可以得到咖啡熟果间、青果间以及熟果和青果间碰撞恢复系数（表3）。

2 挂果枝条柔性模型建立及参数优化

2.1 离散元接触模型选择

小粒咖啡采摘过程中果实果柄间力学行为复杂，采用EDEM中Hert-Mindlin with Bonding模型建立可模拟弯曲、断裂等力学行为的挂果枝条柔性模型，在该模型中各果实颗粒与果柄颗粒在接触点处互相粘结形成粘结键，粘结键的作用效果相当于果实与果柄间的结合力，可用于表征果实与果柄间的粘结作用及断裂形式，粘结键产生的力和力矩计算式为[18]

$$\begin{cases} F_b^n = -v_n S_n A t \\ F_b^t = -v_t S_t A t \\ M_b^n = -\omega_n S_t J t \\ M_b^t = -\omega_t S_n \dfrac{J}{2} t \end{cases} \tag{1}$$

式中 F_b^n——法向粘结力，N

F_b^t——切向粘结力，N

M_b^n——法向力矩，N·m

M_b^t——切向力矩，N·m

t——时间步长，s

v_n——法向速度，m/s

v_t——切向速度，m/s

ω_n——法向角速度，rad/s

ω_t——切向角速度，rad/s

J——惯性矩，m^4

A——接触面积，m^2

S_n——单位面积法向刚度，N/m^3

S_t——单位面积切向刚度，N/m^3

当所受外力大于粘结键力和力矩4个力中的任意一个时，粘结键将发生断裂，断裂计算式为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \dfrac{-F_n}{A} + \dfrac{2M_b^t}{J} R_b \\ \tau_{\max} < \dfrac{-F_t}{A} + \dfrac{2M_b^n}{J} R_b \end{cases} \tag{2}$$

式中 $\sigma_{\max}$——临界法向应力，Pa

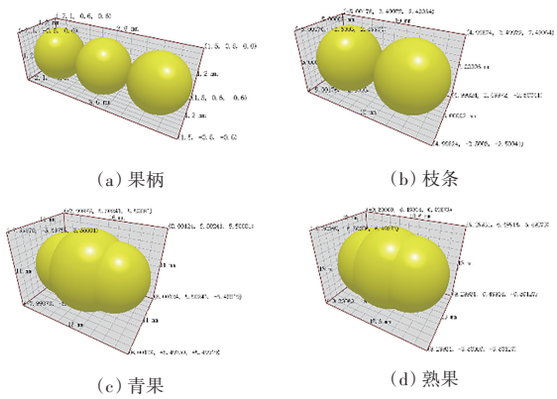
$\tau_{\max}$——临界切向应力，Pa

R_b——粘结盘半径，m

2.2 离散元柔性模型建立

利用EDEM创建模型时，构建模型颗粒数越多，模型越贴近真实形态，但随着颗粒数增多，仿真计算量也随之增大，仿真时间更长[19]。经前期实地调研结果可知，叶片对采摘结果影响很小，为在保证模型还原度较高的前提下较少颗粒数量，对小粒咖啡挂果枝条模型进行简化，对枝条、果柄、青果与熟果建模，不对叶片建模。依据1.2节试验测定结果，利用EDEM中球体堆叠方法构建如图9所示的挂果枝条各部分的离散元多球面聚合模型，其中，构建枝条单元颗粒数为2，三轴尺寸为25.6 mm×6.4 mm×6.4 mm；构建果柄颗粒数为3，三轴尺寸为3.6 mm×1.2 mm×1.2 mm；构建青果颗粒数为3，三轴尺寸为11 mm×11 mm×14.5 mm；构建熟果颗粒数为3，三轴尺寸为12 mm×12 mm×16.5 mm。将各模型利用元颗粒（Meta-Particle）功能依据真实咖啡挂果枝条进行组合，构成咖啡挂果枝条，如图10所示。对枝条单元、果实果柄间添加Hert-Mindlin with Bonding模型，颗粒间生成粘结键，使挂果枝条离散元模型具有一定的柔性特征，

可以模拟物料弯曲与断裂。



(a) 果柄　(b) 枝条　(c) 青果　(d) 熟果

图9　挂果枝条各部分离散元模型

Fig. 9　Discrete element model of each part of fruit branches

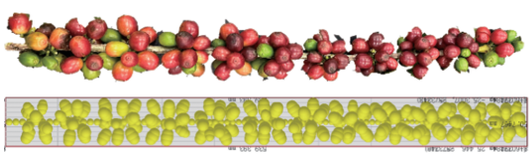


图10　挂果枝条离散元模型

Fig. 10　Fruiting branch discrete element model

2.3　模型参数优化

2.3.1　果实果柄拉伸仿真试验

为进一步优化果实果柄间接触模型的设置参数，在EDEM中以和实际试验相同的设置进行果实果柄拉伸仿真试验，如图11所示，在EDEM后处理界面中在果实果柄结合处添加监测器，通过Total Force确定果实果柄断裂时产生的力。改变果实果柄间Hertz-Mindlin with Bonding接触模型设置参数进行试验，结果表明，当单位面积切向刚度为5.4×10^7 N/m^3、单位面积法向刚度为9.5×10^7 N/m^3、临界切向应力为1.3×10^6 N、临界法向应力为9.7×10^5 N、粘结盘半径为2.2 mm时，咖啡熟果与果柄分离力为6.32 N，与实际测定结果6.14 N误差为2.93%，表明熟果与果柄间模型设置参数的准确性。

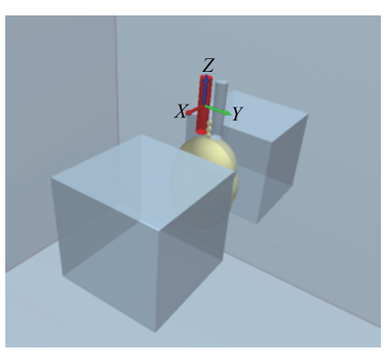
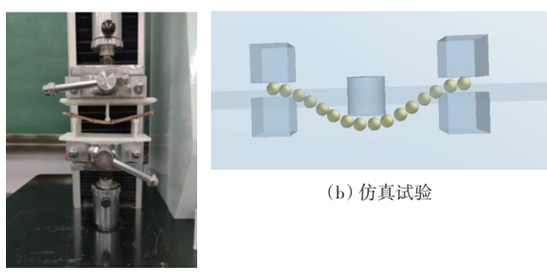


图11　果实果柄拉伸仿真试验

Fig. 11　Fruit stalk tensile simulation test

2.3.2　枝条三点弯曲仿真试验

在EDEM中构建长度为100 mm的枝条，将其两端夹持在支座上，支座两点间距为80 mm，刀具加载速度为0.2 m/s，当枝条发生折断时停止试验，如图12所示。改变枝条单元间Hertz-Mindlin with Bonding接触模型设置参数，进行三点弯曲仿真试验，结果表明，当单位面积切向刚度为1.1×10^8 N/m^3、单位面积法向刚度为9.4×10^7 N/m^3、临界切向应力为1.3×10^8 N、临界法向应力为9.5×10^7 N、粘结盘半径为1.4 mm时，枝条折断时产生力为57.22 N，与相同条件下实际枝条三点弯曲试验[20]测定结果60.53 N误差为5.47%，表明构建枝条单元间模型设置参数可靠。



(a) 现场试验　(b) 仿真试验

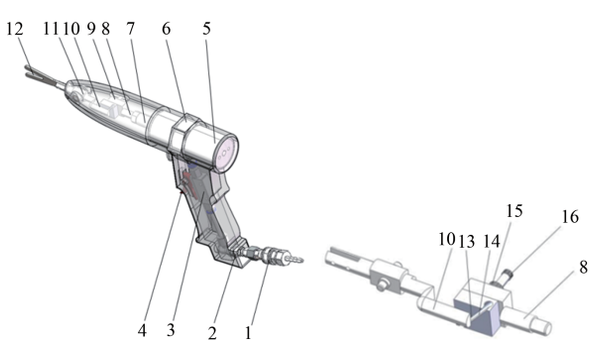
图12　枝条三点弯曲试验

Fig. 12　Three-point bending test of branches

3　咖啡采摘耦合仿真试验

3.1　采摘装置结构与工作原理

根据西南丘陵山地地形特点，采用小型气力振动式咖啡采摘装置[21]，其结构如图13所示，工作时，接通气泵，振动活塞带动伸缩杆做平动，伸缩杆带动调幅轨道做往复直线运动，并带动摆杆摆动，使连接摆杆的振动头带动枝条运动，果实在受迫振动下脱落，完成采摘。调幅机构外设旋钮，转动旋钮可沿壳体前后调节滑道倾角，倾角增大，则摆动幅度增大，输出振幅增大，反之减小。气管进气口端设有调速阀，可通过调节进气量调节振频。



(a) 采摘机构　(b) 调幅机构

图13　气力振动式咖啡采摘机机构示意图

Fig. 13　Mechanism diagram of pneumatic vibration type coffee picking machine

1. 接头　2. 调速阀　3. 二项二通阀　4. 扳机　5. 气缸　6. 消音器　7. 振动活塞　8. 伸缩杆　9. 调幅轨道　10. 摆杆　11. 关节轴承　12. 振动头　13. 滑块　14. 滑道　15. 锁紧螺母　16. 旋钮

3.2　仿真模型建立与环境配置

3.2.1　小粒咖啡采摘装置模型建立

由于EDEM难以分析小粒咖啡采摘过程中产生的较为复杂的力学与动力学问题，而多体系统动力软件

RecurDyn被广泛运用于分析车辆、航天、农业机械等领域的运动[22-24]。因此利用RecurDyn模拟小粒咖啡采摘装置的作业过程。将小粒咖啡采摘装置转换为.x_t格式文件导入RecurDyn中，保持Soildworks与RecurDyn使用统一的长度、质量和时间单位[25]。简化后咖啡采摘装置仿真模型如图14所示。

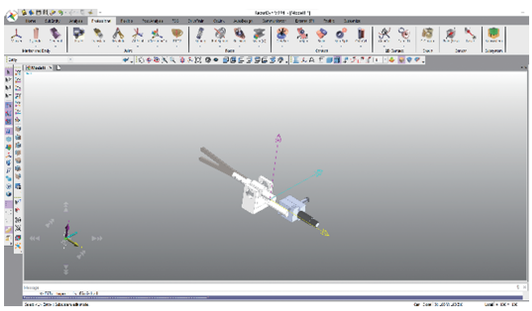


图14 RecurDyn咖啡采摘装置模型图

Fig. 14 Coffea picking device model in RecurDyn

添加完成材料属性(表2)、力学约束和驱动函数后采摘装置模型如图15所示。

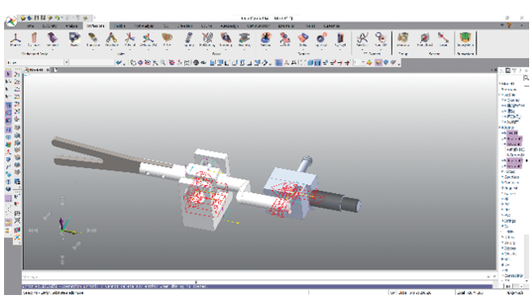


图15 添加约束与驱动的咖啡采摘装置模型图

Fig. 15 Model diagram of coffea picking device with constraints and drive

利用External SPI功能将模型生成为.Wall文件形式，导入EDEM的Import Geometries from RecurDyn中，模型如图16所示。

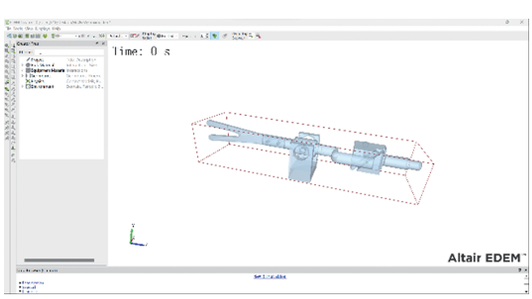


图16 EDEM中咖啡采摘装置模型图

Fig. 16 Coffea harvesting device model in EDEM

3.2.2 耦合仿真试验环境配置

RecurDyn和EDEM中的.Wall文件在耦合仿真试验中仅起到接口封装和信息传输的功能，不影响软件之间计算，模型仍在各自领域内求解，产生的数据仅在特定时间节点进行交换共享。

EDEM与RecurDyn耦合仿真的稳定性与高效性关键在于仿真步长的设置，仿真步长越小，计算结果越准确，但计算时间会增大；仿真步长越大，仿真往往越不稳定，计算结果失真[26]。一般将RecurDyn仿真步长设置为EDEM仿真步长的整数倍，图17为小粒咖啡在RecurDyn与EDEM中的仿真开始阶段状态。

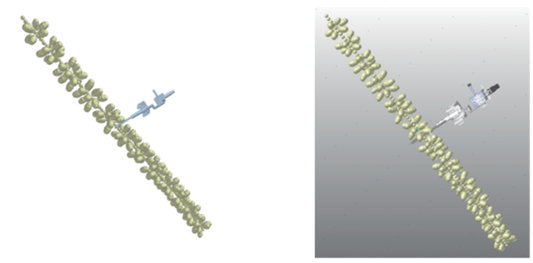


图17 咖啡在EDEM与RecurDyn采摘状态

Fig. 17 Coffea picking state in EDEM and RecurDyn

3.3 单因素仿真试验

为优化咖啡采摘振动参数，开展基于DEM-MBD耦合的咖啡采摘单因素仿真试验。影响采摘机采摘效果的主要因素为振幅、振频、振动位置和振动时间，根据预试验结果，振动位置在枝条近中部的时候采摘效果最佳，因此固定振动位置在枝条中间，选择振频、调幅机构倾角、振动时间为试验因素，分析各因素对采摘质量与枝条损伤的影响，依据预试验与咖啡采摘装置研究成果[27]，设定各因素分别为60 Hz、30°、1.5 s。

为使仿真试验更具有代表意义，小粒咖啡离散元模型按照不同比例生成青果与熟果数量，且Hertz-Mindlin with Bonding接触模型按照10%变化范围设置参数，生成多种力学特性相近的离散元模型用于开展单因素仿真试验，每组仿真试验针对生成的不同模型均重复3次，取试验结果平均值作为最终结果。

以采净率、采熟率、枝条损伤率为试验指标。仿真完成后，利用EDEM后处理功能，分别统计熟果与果柄间、青果与果柄间的bond键断裂数量，结合采摘前生成bond键总数量，计算采净率Y_1与采熟率Y_2，计算式为

$$Y_1 = \frac{n_1}{n} \times 100\% \tag{3}$$

$$Y_2 = \frac{n_2}{n_1} \times 100\% \tag{4}$$

式中 n——咖啡枝条原有果实数量

n_1——采摘咖啡果实数量

n_2——采摘咖啡熟果数量

在夹持头前端添加监测器，记录采摘过程中夹持头在不同工作参数下对咖啡枝条产生作用力的峰值，定义峰值与测定枝条折断时受力比值为枝条损伤率。

每组仿真试验均在采摘装置处于稳定工作状态后，在采摘装置夹持头处生成小粒咖啡离散元模型，为确保柔性模型顺利生成，粘结键生成时间与模型生成时间相差极短，仿真结束后小粒咖啡采摘情况如图18所示。

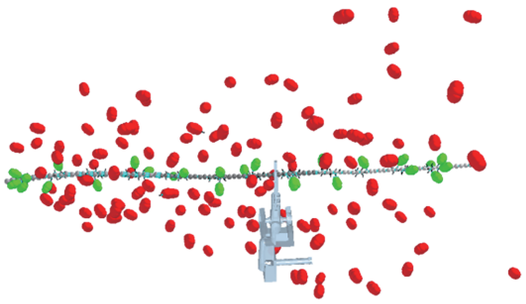


图 18　咖啡采摘仿真试验

Fig. 18　Coffea picking simulation test

3.3.1　振频对采摘过程的影响

设定调幅机构倾角为30°、振动时间为1.5 s，振频分别为30、45、60、75、90 Hz。不同振频下采净率、采熟率、枝条损伤率变化趋势如图19所示。随着振频的增加，采净率、枝条损伤率也随之增加，因为振频越高，作用到枝条的能量越大，果实受迫运动产生加速度越大，更大的惯性力使果实与果柄更易断裂分离，且更多的能量作用在枝条上，加重枝条损伤；采熟率随着振频的增加而下降，因为随着振频增大，青果也开始脱落，降低了采熟率。当振频低于45 Hz时，采熟率相对较高但采净率相对较低，不符合采摘指标；当振频高于75 Hz时，采净率增加缓慢，而采熟率因为更多青果的采摘而降低，且在较高的振频工作下易对枝条造成损伤，因此选取振频为45~75 Hz，在这一范围内，采净率、采熟率较高且枝条损伤率较低。

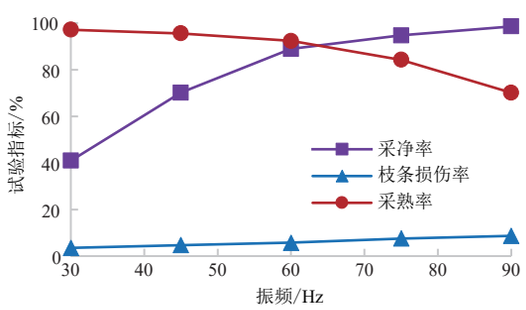


图 19　振频对试验指标的影响

Fig. 19　Influence of vibration frequency on test index

3.3.2　调幅机构倾角对采摘过程的影响

设定振频为60 Hz、振动时间为1.5 s，调幅机构倾角分别为0°、15°、30°、45°、60°。不同调幅机构倾角下采净率、采熟率、枝条损伤率的变化趋势如图20所示。采净率和枝条损伤率随着调幅机构倾角的增加而增大，采熟率随着倾角的增加而下降。倾角在15°~45°这一范围内，采净率、采熟率较高，枝条损伤率较低，因此选取调幅机构倾角为15°~45°。

3.3.3　振动时间对采摘过程的影响

设置振频为60 Hz、调幅机构倾角为30°，振动时间分别为0.5、1、1.5、2、2.5 s。不同振动时间下采净率、采熟率、枝条损伤率变化趋势如图21所示。随着振动时间的增加，采净率、枝条损伤率也随之增加；随着振动时间的增加，采熟率呈先增大后减小的趋势，在1.5 s时达到最大。当振动时间为1~2 s，采净率、采熟率较高且枝条损伤率较低，因此选取振动时间为1~2 s。

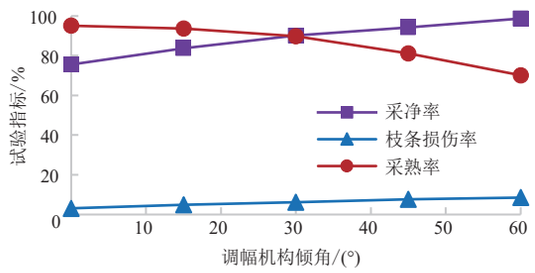


图 20　调幅机构倾角对试验指标的影响

Fig. 20　Influence of inclination angle of amplitude modulation mechanism on test index

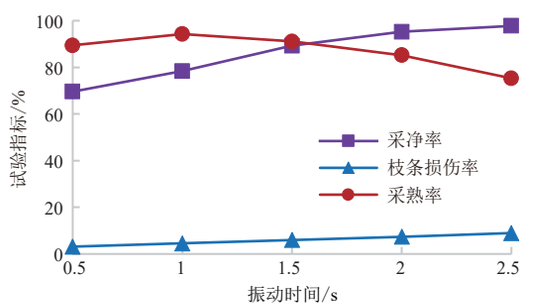


图 21　振动时间对试验指标的影响

Fig. 21　Influence of vibration time on test index

3.4　咖啡采摘仿真试验

3.4.1　仿真试验方案

采用三因素五水平正交试验设计，以振频X_1、调幅机构倾角X_2和振动时间X_3为试验因素，以采净率Y_1、采熟率Y_2、枝条损伤率Y_3为试验指标。通过单因素仿真试验确定各因素水平为振频45~75 Hz、调幅机构倾角15~45°、振动时间1~2 s。

试验因素编码如表4所示，将小粒咖啡离散元模型按照不同比例生成青果与熟果数量，且Hertz-Mindlin with Bonding接触模型按照10%变化范围设置参数，生成多种力学特性相近的离散元模型用于开展二次回归正交旋转组合仿真试验，每组仿真试验针对生成的不同模型均重复3次，以其均值作为试验结果。仿真试验方案与结果如表5所示，x_1、x_2、x_3为编码值。

3.4.2　方差分析

通过Design-Expert 12.0软件对试验数据进行多元回归拟合，得到各试验因素对采净率影响的回归方程，方差分析和显著性检验如表6所示，回归模型P小于0.01，说明模型拟合度极显著。振动频率和作业时间的交互项以及调幅机构倾角和作业时间的交互项的P大于0.1，对采净率影响不显著，其他各项的P检验均显著。失拟项P大于0.05，说明差异不显著，回归模型与实际拟合良好，剔除不显著因素后，得到Y_1与各个试验因素间回归模型方程为

$$Y_1 = 90.5 + 5.23x_1 + 3.96x_2 + 4.62x_3 + 3.97x_1x_2 - 3.45x_1^2 - 2.84x_2^2 - 2.82x_3^2 \quad (5)$$

表4 试验因素编码

Tab. 4 Horizontal coding of experiment factors

编码	因素		
	振频X_1/Hz	倾角X_2/(°)	振动时间X_3/s
−1.682	45	15	1.0
−1	51	21	1.2
0	60	30	1.5
1	69	39	1.8
1.682	75	45	2.0

表5 试验方案与结果

Tab. 5 Experiment scheme and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
	x_1	x_2	x_3			
1	−1	−1	−1	70.25	98.18	4.02
2	1	−1	−1	73.94	95.32	4.95
3	−1	1	−1	76.32	92.15	5.32
4	1	1	−1	84.24	85.12	6.21
5	−1	−1	1	86.69	83.86	5.12
6	1	−1	1	81.52	87.76	9.94
7	−1	1	1	75.53	94.13	5.35
8	1	1	1	97.93	70.59	11.86
9	1.682	0	0	68.89	91.27	5.44
10	−1.682	0	0	94.24	70.18	9.12
11	0	1.682	0	73.64	96.68	4.78
12	0	−1.682	0	92.93	83.35	8.67
13	0	0	1.682	75.56	97.78	3.01
14	0	0	−1.682	91.15	81.16	7.95
15	0	0	0	86.63	92.67	6.88
16	0	0	0	88.57	91.58	7.21
17	0	0	0	92.64	88.15	8.24
18	0	0	0	89.15	90.17	7.85
19	0	0	0	91.36	88.65	6.54
20	0	0	0	94.35	87.34	8.05

表6 采净率Y_1方差分析

Tab. 6 Variance analysis of net collection rate Y_1

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	1 361.98	9	7.67	0.001 9**
x_1	374.06	1	18.96	0.001 4**
x_2	213.87	1	10.84	0.008 1**
x_3	291.60	1	14.78	0.003 2**
x_1x_2	126.40	1	6.41	0.029 8*
x_1x_3	3.95	1	0.20	0.664 2
x_2x_3	15.46	1	0.78	0.396 9
x_1^2	171.68	1	8.70	0.014 5*
x_2^2	116.37	1	5.90	0.035 5*
x_3^2	114.21	1	5.79	0.036 9*
残差	197.28	10		
失拟	156.63	5	4.29	0.082 5
误差	40.65	5		
总和	1 559.25	19		

注:*表示影响显著(0.01≤P<0.05),**表示影响极显著(P<0.01),下同。

各因素对采净率产生影响由大到小为:振频、振动时间、调幅机构倾角、振频的二次项、振频与倾角交互项、倾角的二次项和振动时间二次项。

通过多元回归拟合,得到各试验因素对采熟率影响的回归方程,方差分析和显著性检验如表7所示,回归模型P小于0.01,说明模型拟合度极显著。振动频率和振动时间交互项、调幅机构倾角和振动时间交互项、调幅机构倾角二次项以及振动时间二次项P>0.1,对采熟率影响不显著,其他各项P检验均显著。失拟项P>0.05,说明差异不显著,回归模型与实际拟合良好,剔除不显著因素后,得到Y_2与各个试验因素间回归模型方程为

$$Y_2 = 89.7 - 4.76x_1 - 3.34x_2 - 4.57x_3 - 3.95x_1x_2 - 2.81x_1^2 \quad (6)$$

表7 采熟率Y_2方差分析

Tab. 7 Variance analysis of ripening rate Y_2

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	1 019.35	9	8.90	0.001 0**
x_1	309.36	1	24.31	0.000 6**
x_2	151.91	1	11.94	0.006 2**
x_3	284.94	1	22.39	0.000 8**
x_1x_2	124.90	1	9.81	0.010 6*
x_1x_3	11.88	1	0.93	0.356 7
x_2x_3	10.88	1	0.85	0.376 9
x_1^2	113.55	1	8.92	0.013 6*
x_2^2	3.29	1	0.26	0.622 4
x_3^2	1.17	1	0.092	0.7681
残差	127.27	10		
失拟	105.64	5	4.88	0.053
误差	24.63	5		
总和	1 146.62	19		

各因素对采熟率产生影响由大到小为:振频、振动时间、调幅机构倾角、振频与倾角交互项与振频二次项。

通过多元回归拟合,得到各试验因素对枝条损伤率影响的回归方程,方差分析和显著性检验如表8所示,回归模型P<0.01,说明模型拟合度极显著。振动频率和调幅机构倾角交互项、调幅机构倾角和振动时间交互项、振动频率二次项以及调幅机构倾角二次项P>0.1,对采熟率影响不显著,其他各项P检验均显著。失拟项P>0.05,说明差异不显著,回归模型与实际拟合良好,剔除不显著因素后,得到Y_3与各个试验因素间的回归模型方程为

$$Y_3 = 7.46 + 1.42x_1 + 0.82x_2 + 1.47x_3 + 1.19x_1x_3 - 0.34x_3^2 \quad (7)$$

各因素对枝条损伤率产生影响由大到小为:振频、振动时间、调幅机构倾角、振频与振动时间交互项、振动时间二次项。

表8　枝条损伤率 Y_3 方差分析

Tab. 8　Variance analysis of branch damage rate Y_3

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	84.66	9	19.28	<0.000 1**
x_1	27.36	1	56.13	<0.000 1**
x_2	9.27	1	19.00	0.001 4**
x_3	29.52	1	60.50	<0.000 1**
x_1x_2	0.34	1	0.70	0.423 1
x_1x_3	11.31	1	23.17	0.000 7**
x_2x_3	0.021	1	0.043	0.839 8
x_1^2	0.013	1	0.028	0.871 7
x_2^2	0.74	1	1.52	0.246 1
x_3^2	6.41	1	13.14	0.004 7**
残差	4.88	10		
失拟	2.53	5	1.07	0.47
误差	2.53	5		
总和	89.54	19		

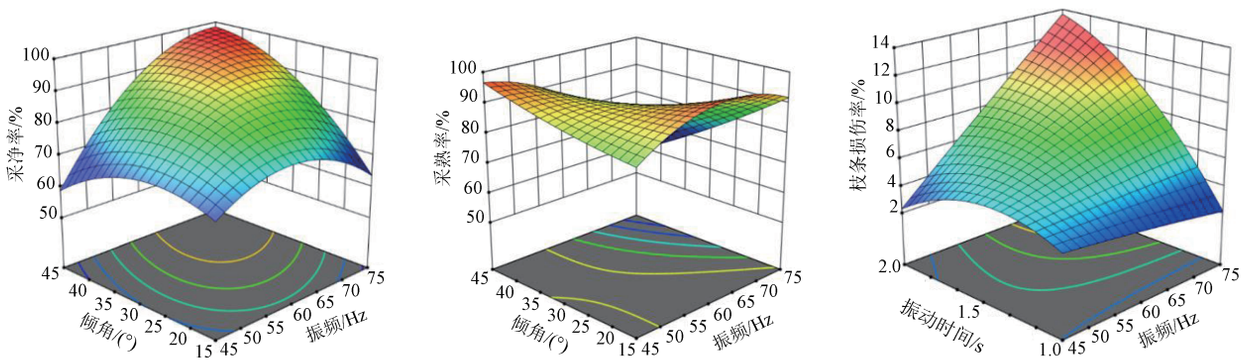
3.4.3　响应曲面分析

为了进一步确定各试验因素的交互作用对咖啡采净率、采熟率和枝条损伤率的影响，选取某一试验因素的较优水平并将该水平固定，利用Origin 9.1软件分别绘制各交互作用的响应曲面图，分析各因素对各试验指标的影响规律。

图22a为振动时间为1.5 s时，振动频率与调幅机构倾角的交互作用对采净率影响的响应曲面。随着振频增加和倾角增大，采净率呈先上升后趋于平缓的趋势，因为振频和振幅越高，果实受迫运动产生的加速度越大，更大的惯性力使果实与果柄更容易断裂分离，直到枝条上的果实几乎全部采摘，故采净率升高趋势减缓。

图22b为振动时间为1.5 s时，振动频率与调幅机构倾角的交互作用对采熟率影响的响应曲面。随着振频增加且倾角增大，采熟率呈现下降趋势，因为更大的惯性力使青果与果柄也容易断裂分离，使采熟率降低。

图22c为调幅机构倾角为30°时，振动频率与振动时间的交互作用对枝条损伤率影响的响应曲面。随着振频与振动时间的增加，枝条损伤率趋向升高，且趋势越来越大，因为对枝条产生的能量不断增大，枝条受损不断加重。



(a) x_3=0，采净率　(b) x_3=0，采熟率　(c) x_2=0，枝条损伤率

图22　因素交互作用对试验指标影响的响应曲面

Fig. 22　Response surfaces of influence of factor interaction on test index

3.4.4　参数优化

为进一步优化采摘装置工作参数，使用Design-Expert 8.0.6对试验结果进行优化。设定采净率大于95%、采熟率大于90%、枝条损伤率小于5%，在工作时间为1.5 s条件下，结合另外两因素取值范围为约束条件，建立小粒咖啡采净率、采熟率和枝条损伤率优化数学模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ 45\ \text{Hz} \leqslant X_1 \leqslant 75\ \text{Hz} \\ 15^\circ \leqslant X_2 \leqslant 45^\circ \end{cases} \tag{8}$$

得到符合设定值的参数优化范围，如图23所示。对优化后结果进行验证，当振动时间为1.5 s、振频为64 Hz、倾角为40°时，采净率为96.63%，采熟率为92.34%，枝条损伤率为4.71%，采摘装置作业性能符合设定预期值。

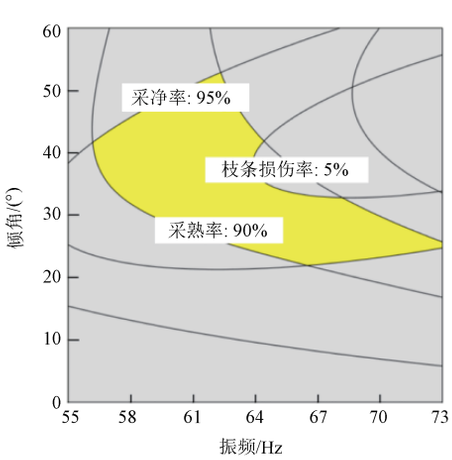


图23　参数优化分析

Fig. 23　Parameter optimization analysis

3.5　咖啡采摘田间试验

为验证优化后的采摘装置的作业参数，在云南普洱市淳乐咖啡种植示范基地进行田间试验验证，试验时间

为2023年11月30日，海拔为1 378 m，相对湿度为78.9%，温度为15.8 ℃，风速为0.7 m/s，采摘过程如图24所示。



图24 咖啡采摘田间试验

Fig. 24 Field experiment of coffea picking

为保证田间试验与仿真试验条件一致，选用与构建离散元模型果实成熟度趋于一致的卡蒂姆种小粒咖啡枝条20支，记录枝条上初始青果与熟果数量，将采摘装置调至优化后的工作参数，待装置工作稳定后，开展田间采摘试验。

统计采摘下的青果与熟果数量，利用手机摄影“慢动作”拍摄功能记录采摘过程中枝条产生的最大挠度，与枝条三轴压缩试验折断时产生的最大挠度17.25 mm进行对比，同一枝条重复试验10次，试验结果取平均值。图25为采摘试验时枝条发生最大挠度时的视频图像。最后得到采净率平均值为92.54%，采熟率平均值为95.47%，枝条损伤率平均值为5.01%，与仿真试验相对误差分别为4.23%、3.39%和6.37%，优化参数可靠。

4 结论

（1）以云南省小粒咖啡典型品种“卡蒂姆”为研究对象，对采收期咖啡枝条、果柄、青果和熟果的树形参数及力学特性参数进行测量统计；采用斜面法和自由落体碰撞试验，通过EDEM仿真试验标定确定了咖啡熟果之间、青果之间、青果熟果之间以及枝条和采摘装置材料间的接触特性仿真参数值。



（a）初始作业状态 （b）产生最大挠度状态

图25 枝条损伤挠度捕捉

Fig. 25 Branch damage deflection capturing

（2）利用EDEM多球体组合法构建枝条、果柄、青果与熟果的离散元模型，对果实与果柄间、枝条单元间添加Hertz-Mindlin with Bonding接触模型，利用元颗粒功能依据真实咖啡挂果枝条进行组合，构建咖啡挂果枝条柔性模型。选用气力式手持振动采摘装置，在RecurDyn软件中建立采摘装置模型，通过EDEM-Recurdyn耦合咖啡采摘单因素仿真试验，得到各因素为振频45~75 Hz、调幅机构倾角15°~45°、振动时间1~2 s。

（3）通过设计二次回归正交旋转组合试验，得到采净率、采熟率和损伤率的回归方程，方差分析表明，因素对采净率和采熟率影响由大到小为振频、振动时间和调幅机构倾角，对损伤率影响由大到小为振动时间、振幅和调幅机构倾角。通过参数优化得到当振频为64 Hz、倾角为40°、振动时间为1.5 s时，可达到采净率为96.63%，采熟率为92.34%、枝条损伤率为4.71%的作业效果。田间试验结果表明，优化的采摘装置作业参数可靠。

参 考 文 献

[1] 云南省农业农村厅. 2022年云南省咖啡产业发展报告[R]. 2023.

[2] 黄家雄，李维锐，夏兵，等. 云南咖啡产业高质量发展对策初探[J]. 热带农业科技，2022，45(3)：21－29.
HUANG Jiaxiong, LI Weirui, XIA Bing, et al. Preliminary study on high-quality development countermeasures of coffee industry in Yunnan [J]. Tropical Agricultural Science and Technology, 2022, 45(3): 21－29. (in Chinese)

[3] 张明达，王睿芳，李艺，等. 云南省小粒咖啡种植生态适宜性区划[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2020，28(2)：168－178.
ZHANG Mingda, WANG Ruifang, LI Yi, et al. Ecological suitability regionalization of *Coffea arabica* planting in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture (Chinese and English), 2020, 28(2): 168－178. (in Chinese)

[4] HORABIK J, MOLENDA M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206－225.

[5] ZHAO H B, HUANG Y X, LIU Z D, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review [J]. Agriculture, 2021, 11(5): 425.

[6] 曾智伟，马旭，曹秀龙，等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：1－20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1－20. (in Chinese)

[7] ABHAY P, KINGSLY AMBROSE R P, MARK E C. Discrete element method as an approach to model the wheat milling process [J]. Powder Technology, 2016, 302: 350－356.

[8] COETZEE J C, LOMBARD G S. The destemming of grapes: experiments and discrete element modelling [J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 232－248.

[9] 廖宜涛，廖庆喜，周宇，等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报，2020，51(6)：73－82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6): 73 - 82. (in Chinese)

[10] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 236 - 243.
LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 236 - 243. (in Chinese)

[11] 王万章,刘婉茹,袁玲合,等.小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):170 - 180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2):170 - 180. (in Chinese)

[12] YI Wang, ZHANG Yitan, YANG Yan, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification [J]. Biosystems Engineering, 2020, 200:400 - 414.

[13] JESUSIMO D J. Classification of immature and mature coffee beans using RGB values and machine learning algorithms[J]. Int. J. Emerg. Trends Eng. Res, 2020, 8(1): 3016 - 3022.

[14] 周祖锷. 农业物料学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 55.

[15] 于英杰,王剑,赖庆辉,等. 手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):124 - 133.
YU Yingjie, WANG Jian, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of hand-held vibrating comb-type *Coffea arabica* L. harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 124 - 133. (in Chinese)

[16] 张国忠,陈立明,刘浩蓬,等.荸荠离散元仿真参数标定与试验[J].农业工程学报,2022,38(11):41 - 50.
ZHANG Guozhong, CHEN Liming, LIU Haopeng, et al. Alibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38 (11): 41 - 50. (in Chinese)

[17] 杨立权. 切流横轴玉米脱粒系统设计及试验研究[D]. 郑州:河南农业大学,2018.
YANG Liquan. Design and experiment research based on tangential flow transverse axial flow corn threshing system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[18] 刘凡一,张舰,李博,等.基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J].农业工程学报,2016,32(12):247 - 253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(12):247 - 253. (in Chinese)

[19] 李艳洁,徐泳.用离散元模拟颗粒堆积问题[J].农机化研究,2005,27(2):57 - 59.
LI Yanjie, XU Yong. Discrete element simulation of particle packing problem [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005, 27 (2): 57 - 59. (in Chinese)

[20] 王奇瑞,毛罕平,李青林. 基于离散元的柔性作物茎秆振动响应仿真[J]. 农业机械学报, 2020,51(11): 131 - 137.
WANG Qirui, MAO Hanping, LI Qinglin. Simulation of vibration response of flexible crop stem based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11): 131 - 137. (in Chinese)

[21] 曹颖,于英杰,赖庆辉,等. 一种振动式咖啡采摘机:202210921726.3[P]. 2024-07-12.

[22] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等.香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J].农业机械学报,2023,54(5):121 - 130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023, 54(5): 121 - 130. (in Chinese)

[23] YEON-SOO K, SANG-DAE L, SEUNG-MIN B, et al. Development of DEM-MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202(0168-1699):1 - 13.

[24] 董向前,苏辰,郑慧娜,等.基于DEM-MBD耦合算法的振动深松土壤扰动过程分析[J].农业工程学报,2022,38(1):34 - 43.
DONG Xiangqian, SU Chen, ZHENG Huina, et al. Analysis of soil disturbance process of vibrating subsoiling based on DEM-MBD coupling algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38 (1): 34 - 43. (in Chinese)

[25] 张智泓,赵亮亮,赖庆辉,等.基于DEM-MBD耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J].农业工程学报,2022,38(15): 10 - 20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiment of shovel-type rolling soil-engaging parts based on DEM-MBD coupling [J]. Transactions of the CSAE, 2022,38 (15): 10 - 20. (in Chinese)

[26] ZHANG B, WANG J, YANG X, et al. A DEM-MBD based method for regulating transfer flux in the supply and discharge of cane seed particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,218:1 - 15.

[27] YU Yingjie, CAO Ying, LAI Qinghui, et al. Design and operation parameters of vibrating harvester for *Coffea arabica* L. [J]. Agriculture, 2023,13(3): 1 - 22.