

酿酒葡萄低漏损鱼鳞式集果装置设计与试验

马 帅 周慧能 黄镇东 郭朝阳 马俊龙 沈聪聪 伍春霖 徐丽明
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对酿酒葡萄机械化采收过程中集果环节漏果率高、果实损伤严重等问题,设计了一种低漏损鱼鳞式接果输送装置。本研究建立了集果装置的动力学仿真模型,分析了其运动过程。在形状优化和单因素试验的基础上以漏果面积为评价指标,进行了弹簧劲度系数、对侧接果板重叠宽度、单侧接果板阵列间距和空白组的四因素三水平正交试验,结果表明前3个因素分别取0.7 N/mm、45 mm和100 mm时漏果面积最小,为1 036 mm²。建立了RecurDyn-EDEM耦合仿真模型,对多个品种进行了仿真集果试验,验证了方案的可行性。研制了集果装置样机,通过果粒落点分布标定试验得到风险漏果区的果粒分布比例 φ 小于15%。集果试验结果表明,装置对多个品种漏果率平均值小于4%,最大值为白玉霓品种(5.81%),最小值为熊岳白品种(3.19%)。漏果率与果粒直径整体呈负相关关系,且果粒破损越严重漏果率越高。仿真试验值与实际试验值的最大绝对误差为4.16%,证明模型具有较好的准确性。

关键词: 酿酒葡萄; 鱼鳞式集果装置; RecurDyn-EDEM耦合仿真; 漏果率

中图分类号: S224.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)19-0279-10 OSID: 

Design and Experiment of Low-loss Fish-scale Fruit Collection Device for Wine Grape Harvesting

Ma Shuai Zhou Huineng Huang Zhendong Guo Zhaoyang Ma Junlong Shen Congcong
Wu Chunlin Xu Liming
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of high fruit loss rate and severe berry damage during mechanized wine grape harvesting, a low-loss fish-scale fruit-catching and conveying device was designed. A dynamic simulation model of the fruit collection device was established to analyze its motion characteristics. Based on structural optimization and single-factor experiments, an orthogonal experiment with four factors and three levels was conducted with fruit loss area as the evaluation index. The results showed that the minimum fruit loss area was 1 036 mm² when the spring stiffness coefficient, overlap width of opposite fruit-catching plates, and spacing of unilateral fruit-catching plate arrays were 0.7 N/mm, 45 mm, and 100 mm, respectively. A RecurDyn-EDEM coupled simulation model was established to perform simulated fruit collection tests for different grape varieties, and the feasibility of the device was verified. A prototype was developed, and the berry distribution ratio φ in the risk fruit-loss region was less than 15% based on berry falling-point distribution tests. The results of fruit collection tests showed that the average fruit loss rate of the device was less than 4% for different grape varieties, with the maximum value of 5.81% for ‘Baiyuni’ and the minimum value of 3.19% for ‘Xiongyuebai’. The fruit loss rate was negatively correlated with berry diameter, and increased with the aggravation of berry damage. The maximum absolute error between simulation and experimental results was 4.16%, indicating that the model had good accuracy. The research result can provide a theoretical basis and technical support for mechanized wine grape harvesting.

Key words: wine grape; fish-scale fruit collection device; RecurDyn-EDEM coupled simulation; fruit loss rate

0 引言

酿酒葡萄是世界最重要的酿酒原料之一,我国酿酒葡萄种植面积和产量均位居世界前列。欧美等传统葡萄酒生产国家的酿酒葡萄采收作业绝大多数采用机械化方式^[1]。国内酿酒葡萄机械化采收研究起步较晚,相关研究仍以试验研究为主,商业化装备应用较少^[2],还没有商业化产品与装备。而酿酒葡萄采收作业在集果环节仍存在漏果率高、果实损伤大等问题^[3]。这不仅造成直接的经济损失,还影响果实品质和原料利用率。因此,迫切需要优化酿酒葡萄采收机械的集果部件,提高集果性能,降低漏果率和果实损伤程度,以推动我国酿酒葡萄生产向高效、优质方向发展。

国外对酿酒葡萄机械化收获的研究较早,同时对相关技术掌握较为成熟。New Holland 公司于 2014 年向市场推出 BRAUD9090X 型酿酒葡萄收获机^[4],可以满足酿酒葡萄的收获作业。党永强^[5]研究了圆环链集果输送装置,该机型的集果装置采用无级链式提水斗,其外壳采用食用型聚氨基甲酸酯材料制成,具备良好的耐磨性。杨兰涛等^[6]针对酿酒葡萄机械化采收过程中的果实收集与输送问题,设计了由双铰接链轨道、柔性接料斗及挡板组成的收集输送机构,通过封闭式输送结构实现葡萄果粒的连续收集与转运,提高了采收过程的可靠性。Novák 等^[7]使用两种自走式收获机 GREGOIRE G 152 和 NEW HOLLAND VL 6060,根据不同的收获和抓取机制面对全机械化收获浆果的收获损失进行评估。其中 GREGOIRE G 152 型葡萄收获机的集果装置为刮板式,NEW HOLLAND VL 6060 型葡萄收获机的集果装置为提水斗式。结果表明,虽然两种机型存在集果装置结构设计的差异化,但漏粒损失相差不大,并都在可接受范围内。

与葡萄同为浆果的蓝莓收获时,也采用振动式收获,大多数蓝莓收获机采用的集果方式为刮板式^[8-9]。Sargent 等^[10-11]使用改良的跨行收获机以振动方式收获蓝莓,可将挫伤降至最低。试验表明,使用改进接果板收获的蓝莓严重瘀伤率为 16% ~ 26%,要优于刚性接果板(27% ~ 40%),并进行商业包装后,改进接果板收获的蓝莓与人工收获的蓝莓质量相近。鲍玉冬等^[12]对蓝莓果实变形能及其碰撞过程展开研究,以果实储存变形能大小评价其损伤程度,通过有限元仿真技术对变形能进行计算,确定果实下落高度和接果板角度为影响变形能的主要因素,并对其进行优化,确定参数组合,得到接果板角度接近 15°时,果实损伤最少。

本文针对酿酒葡萄机械化振动果粒采收过程中存在漏果率高、果实损伤大等问题,设计出鱼鳞式集果装置。通过理论分析确定影响漏果率的主要因素,建立 RecurDyn-EDEM 耦合仿真模型,优化集果装置最优工作参数组合并通过台架试验验证,以期减少果粒漏损,为我国酿酒葡萄收获机中针对不同葡萄品种集果部件的研究提供参考。

1 集果装置结构与工作原理

1.1 总体结构

集果装置位于酿酒葡萄振动式果粒收获机中振动收获部件的下方(图 1),其主要功能是收集和传输受到振动收获部件的作用而发生脱落的葡萄果粒。集果装置主要由输送装置(图 2a)和鱼鳞式集果装置(图 2b)组成,鱼鳞式集果装置安装在两个对置的输送装置中间。输送装置的传送带可以收集并传输由鱼鳞式集果装置收集到的果粒,传送带上的隔板可以保证果粒的稳定传输。鱼鳞式集果装置的接果板为碳纤维材质,其上安装有柔性硅胶板,同侧相邻的接果板之间有一定的重叠,两侧的接果板在中间区域有一定的重叠。接果板倾斜固定安装在回位板上,中间高,两侧低,以保证果粒可以顺利滚落到传输带上。回位板通过铰链安装在安装架上,可绕垂直方向转动。回位板与安装架之间还通过回位弹簧连接,以实现接果板被葡萄藤撑开后的自动回位功能。结合种植模式和收获方式,确定集果装置的主要技术参数,如表 1 所示。



图 1 酿酒葡萄收获机总体结构图

Fig. 1 Overall structure of wine grape harvester

1. 除杂部件 2. 环形输送部件 3. 集果部件 4. 振动收获部件

1.2 工作原理

作业前,集果装置通过安装架固定在两侧的传送带上。作业时,葡萄藤由图 2b 右侧进入集果装置,两侧接果板与葡萄藤相接触,单个接果板以铰链回转中心为轴发生转动,当葡萄藤离开该接果板并与下一个接果板发生接触时,该接果板在弹簧的作

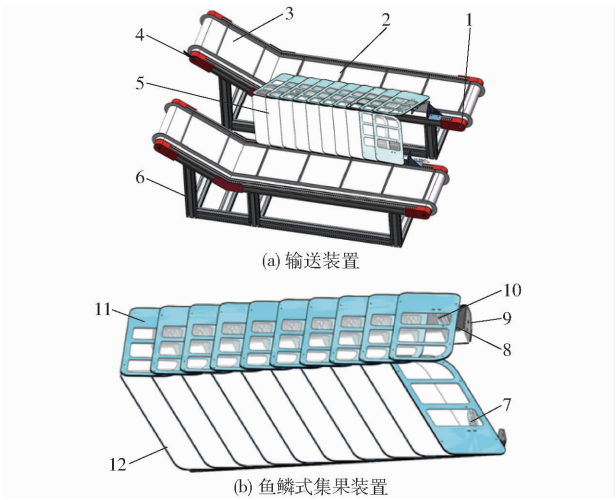


图 2 集果装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of fruit-gathering device

1. 从动轴 2. 传送带分隔板 3. 传送带 4. 主动轴 5. 鱼鳞式集果装置 6. 机架 7. 回位板 8. 回位弹簧 9. 安装架 10. 铰链 11. 接果板 12. 柔性硅胶板

表 1 集果输送装置主要参数

参数	数值
装置总长/mm	2 080
装置总宽/mm	1 480
接果板数量/个	20
接果面积/m ²	0. 88
接果板摆动角度/(°)	± 18

用下进行回位,以此循环,直至该葡萄藤离开集果装置。葡萄藤从集果装置中穿过的同时,脱离的葡萄果粒会下落至接果板上,并沿接果板滚落至输送装置。集果装置在遇到障碍物如立柱能够被动避障并迅速自动回位,有效防止果粒从缝隙中掉落,保证集果的连续性和稳定性。

2 集果过程运动分析

目前酿酒葡萄收获机多为跨行采收,其中的集果部件主要分为提水斗式和接果板式^[13]两种。而接果板式的集果部件成本低、安装简便,被大多数机型采用。接果板式集果部件在集果过程中造成果粒损失的主要原因有两类:一是果粒从集果装置的缝隙中掉落,二是果粒下落至接果板后发生破碎造成损伤。本研究基于鲍玉冬等^[12]对蓝莓果实碰撞损伤的分析将接果板设计为两层,上层柔性硅胶板与下层中空碳纤维板,从而起到了缓冲^[14-15]的作用。因此主要针对第 1 种原因造成的漏果损失进行分析。

作业过程中,接果板侧边与葡萄藤接触从而产生缝隙,接果板形状(图 3)也会影响缝隙的产生,接

果板回位过慢也会产生缝隙;缝隙越大,发生漏果现象的概率就越大,损失的果粒就越多。因此本研究以集果过程中产生的缝隙面积为评价指标。由于接果板式的集果部件中每块接果板为悬臂梁,因此接果板需要较高的刚性,故将接果板视作刚体,所以两侧接果板边缘与圆柱形葡萄藤接触时必然会产生缝隙。葡萄藤经过每块接果板主要分为 3 个阶段。本研究通过 RecurDyn 仿真软件对集果过程进行运动仿真分析,对模型进行约束并设置相关参数^[16],如图 4 所示。

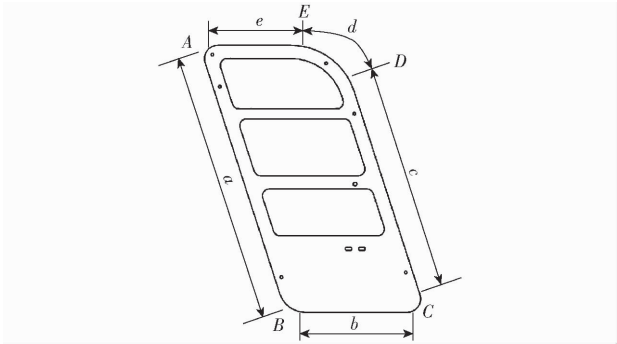


图 3 接果板形状

Fig. 3 Geometry of fruit-gathering board shape

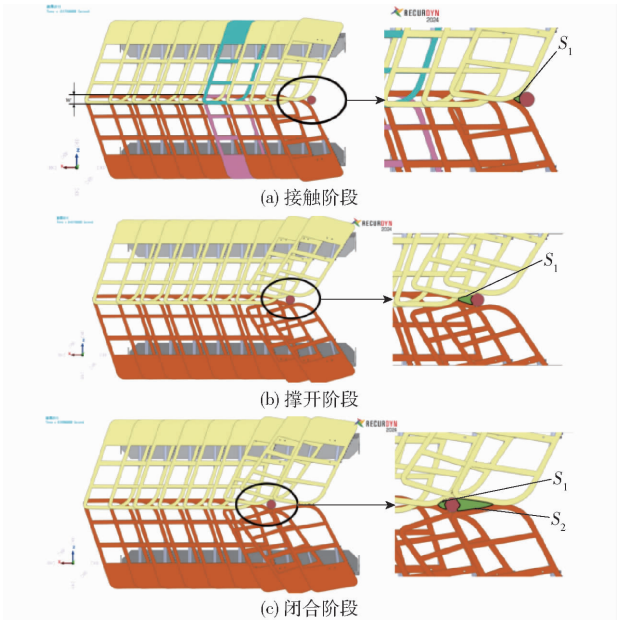


图 4 葡萄藤与接果板接触的不同阶段

Fig. 4 Different stages of contact between grape vine and fruit-gathering board

接触阶段是葡萄藤与接果板刚发生接触(图 4a),即葡萄藤与两侧接果板的 DE 边接触,此时漏果面积 S 由两部分组成,一部分是葡萄藤与接果板 DE 边组成的面积 S₁,另一部分是葡萄藤与已经过接果板组成的面积 S₂(图 4c),葡萄藤经过集果装置时,除第 1 列接果板外,同一时刻要接触相邻接果板的不同边,计算式为

$$S = S_1 + S_2 \tag{1}$$

撑开阶段是葡萄藤与接果板的 AE 边发生接触,见图 4b,此时漏果面积由 S_1 与 S_2 组成。闭合阶段是葡萄藤与接果板结束接触,如图 4c 所示,此时葡萄藤已与下一块接果板 DE 边发生接触,漏果面积由 S_1 与 S_2 组成。

经过上述对集果过程的运动分析可知,影响漏果面积 S_1 的因素主要有接果板 DE 边的圆弧半径、对侧接果板重叠宽度和葡萄藤直径。

如图 5 所示,对于漏果面积 S_2 ,可简化为四边形 $FGOH$ 的面积 S_3 减去扇形 OGH 的面积 S_4 ,得到计算公式

$$S_2 = S_3 - S_4 \tag{2}$$
$$S_3 = l_{GF}l_{OG} \tag{3}$$
$$S_4 = 2 \frac{(90^\circ - \theta) \pi r^2}{360^\circ} \tag{4}$$

其中

- 式中
- S_3 ——

四边形 $FGOH$ 的面积, mm^2
- S_4 ——

扇形 OGH 的面积, mm^2
- l_{GF} ——

葡萄藤与接果板 AE 边接触切点走过的距离, mm
- l_{OG} ——

线段 OG 长度, mm
- θ ——

接果板与葡萄藤中心连线相对水平方向夹角, $(^\circ)$
- r ——

葡萄藤半径, mm

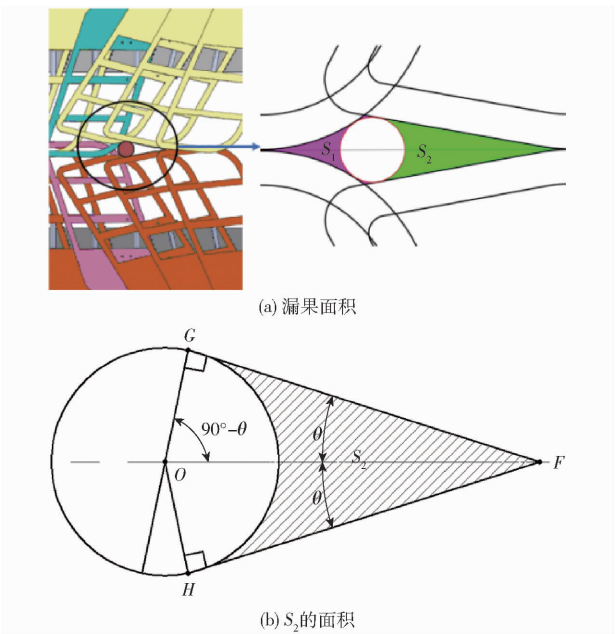


图 5 漏果面积示意图
Fig.5 Schematics of fruit leakage area

将式(3)、(4)代入式(2),整理得

$$S_2 = \frac{r^2}{\tan \theta} - \frac{(90^\circ - \theta) \pi r^2}{180^\circ} \tag{5}$$

由式(5)可见,集果过程中产生的漏果面积 S_2 与葡萄藤半径和接果板转动角度有直接关系。接果板转动角度与接果板形状有关,由公式(5)可以看

出,当葡萄藤直径一定、接果板形状一定时,接果板转动角度越大,漏果面积越大。此外,影响接果板转动的因素有单侧接果板阵列间距和对侧接果板重叠宽度。在运动过程中,集果装置中弹簧劲度系数影响接果板回位速度,回位越慢漏果面积被回填的速度越慢,因此该因素是影响漏果面积的因素之一。

综上,由理论分析可知,影响总漏果面积($S_1 + S_2$)的因素有葡萄藤直径、接果板形状参数、单侧接果板阵列间距、对侧接果板重叠宽度和弹簧劲度系数。

3 参数优化仿真试验

为了分析具体因素对漏果面积的影响,建立 RecurDyn 动力学模型进行仿真分析与参数优化,并结合 EDEM 离散元仿真^[17],对集果装置的工作过程进行仿真分析,分析其漏果情况。

3.1 RecurDyn 仿真模型建立

将三维模型导入 RecurDyn 中,为简化仿真模型,接果板仅导入下方碳纤维板进行仿真,对集果装置添加质量属性、约束、载荷等仿真参数,如图 6 所示。实际工作时,集果装置接触的葡萄藤部分可近似为竖直的圆柱体,根据在烟台瀑拉谷酒庄测得葡萄藤直径数据结合现有研究数据^[18],葡萄藤直径小于 40 mm,将葡萄藤直径设置为 40 mm,在极端情况下分析其它影响因素,该工况可作为极限条件进行分析,实际工况下漏果率低于该条件。

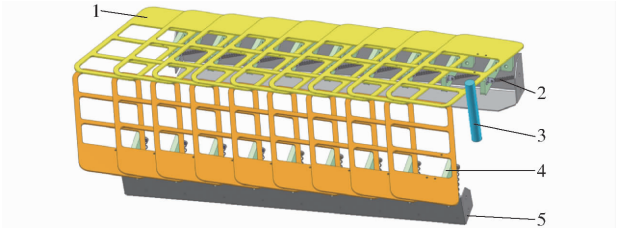


图 6 集果装置虚拟样机模型
Fig.6 Virtual prototype model of fruit-gathering device
1. 镂空板 2. 回位弹簧 3. 葡萄藤 4. 回位板 5. 安装架

根据 RecurDyn 中运动副分类及接果板实际运动情况,定义各构件之间运动副,表 2 中列出了集果装置各个零件之间所设置的运动副情况。

表 2 集果装置虚拟样机模型的运动副
Tab.2 Kinematic pairs of virtual prototype model of fruit-gathering device

配合零件	运动副
地面-固定架	固定副
回弹固定件-机架	旋转副
回弹固定件-接果板	固定副
葡萄藤-固定架	移动副

集果装置中其余同名零件均按照表 2 进行相应运动副的约束。根据集果装置实际工作情况,在葡萄藤与接果板之间添加 Geo surface contact 接触^[19]确定影响集果效果的因素,将回位机构中的实体弹簧更换为 RecurDyn 中的弹簧力,该力一端固定在机架上,另一端作用在回弹固定件的孔位上。

为了获得最小的漏果面积,以漏果面积作为评价指标,将接果板形状参数与其他参数分别进行集果仿真试验。

3.2 接果板形状优化

设计 3 种接果板形状:平行四边形(图 7a)、五边形(图 7b)、六边形(图 7c),在相同工况下进行仿真对比试验。

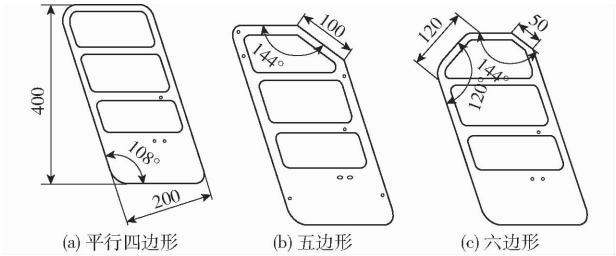


图 7 不同形状的接果板

Fig. 7 Fruit-gathering boards of different shapes

仿真试验时,为简化仿真,将葡萄藤固定、整机

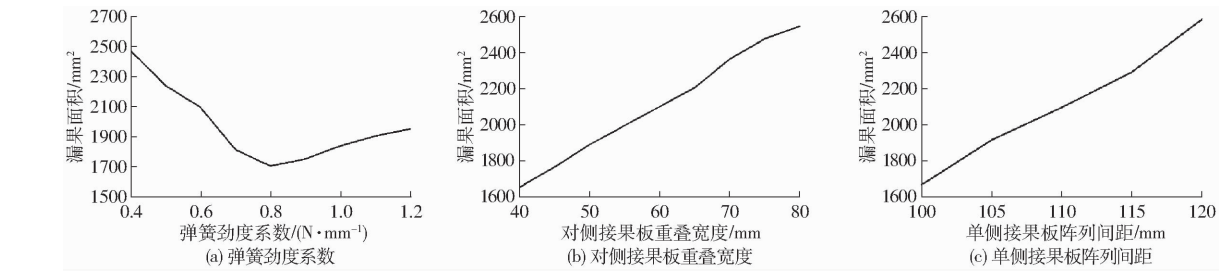


图 8 各因素对漏果面积的影响仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of influence of various factors on leaking fruit area

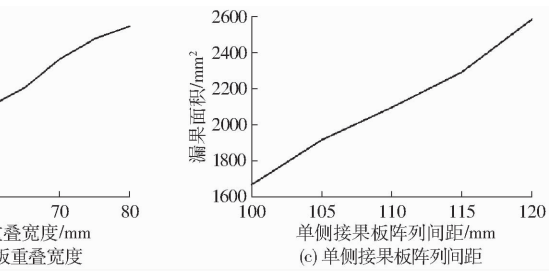
由图 8 分析可知:在所选水平参数区间内,随弹簧劲度系数增大,漏果面积逐渐减小后缓慢增大,因为在劲度系数较小时,弹簧产生的拉力较小,接果板无法及时回弹,造成较大的漏果面积,但当劲度系数超过一定值时,接果板回弹过快,又造成一定程度的漏果面积出现(图 8a);当对侧接果板重叠宽度的取值范围在 40 ~ 80 mm 时,随对侧接果板重叠宽度增大,漏果面积逐渐增大,显示出正相关性,当对侧接果板重叠宽度增大,葡萄藤会使接果板转动角度增大,由公式(5)可知,漏果面积也增大(图 8b);当单侧接果阵列间距取值范围在 100 ~ 120 mm 时,随阵列间距增大,漏果面积逐渐增大。因为当接果板的阵列间距增大后,同一时间内与葡萄藤接触的接果板减少,无法填补葡萄藤运动过程中产生的缝隙,所

前进的运动方式转化为葡萄藤前进、整机固定的运动方式。为保证与实际作业条件相吻合,设置葡萄藤前进速度为 2 km/h^[6],总体仿真时间为 2.5 s,仿真步数为 1 000 步。每组仿真结束后,对集果过程不同阶段进行截图,将图像插入至 AutoCAD,利用样条曲线对漏果区域进行框选,得到漏果面积,不同组选取相同阶段的相同时间进行截图。

仿真结果显示,五边形接果板的最大漏果面积为 1 650 mm²,六边形接果板的最大漏果面积为 2 426 mm²,平行四边形接果板的最大漏果面积为 2 012 mm²,五边形接果板的最大漏果面积相较于六边形和平行四边形分别减小 32% 和 18%。因此,选择五边形结构为后续优化设计的基础形态。

3.3 关键参数优化

针对影响集果效果的主要参数进行仿真,为分析各因素对集果效果的影响,基于前述分析对弹簧劲度系数、对侧接果板重叠宽度和单侧接果板阵列间距进行单因素试验。单因素试验参数区间为:弹簧劲度系数为 0.2 ~ 1.0 N/mm,对侧接果板重叠宽度为 40 ~ 80 mm,单侧接果板的阵列间距为 100 ~ 120 mm。在单独考察某一对象时,将另外 2 个试验因素的值设置为各自水平的中间值,图 8 所示为 3 个因素的仿真结果。



以漏果面积逐渐增大(图 8c)。

根据上述试验和理论分析,选取对集果效果影响显著的 3 个参数:弹簧劲度系数、对侧接果板重叠宽度和单侧接果板阵列间距进行正交试验。采用 L₉(3⁴) 正交表,以漏果面积 S 为试验指标,各因素水平如表 3 所示,试验设计及结果如表 4 所示,其中 A 为弹簧劲度系数,B 为对侧接果板重叠宽度,C 为单侧接果板阵列间距,D 为空白组。

表 3 试验因素水平

Tab.3 Test factors and levels

水平	A/(N·mm ⁻¹)	B/mm	C/mm	D
1	0.7	40	100	1
2	0.8	45	105	2
3	0.9	50	110	3

如表 4 所示,根据试验结果计算 3 个因素在不同水平下的漏果面积均值 K_1 、 K_2 和 K_3 , 然后根据均值计算每个因素的极差。极差由大到小顺序为 R_C (220.33 mm^2)、 R_A (91.00 mm^2)、 R_B (84.00 mm^2)、 R_D (42.67 mm^2)。 R_D 明显小于前 3 个因素表明试验误差较小且相对稳定,验证了试验设计的可靠性。结果表明单侧接果板阵列间距对漏果面积的影响最大,弹簧劲度系数次之,对侧接果板重叠宽度影响最小。综合考虑 3 个因素的极差和水平均值,得到最优参数水平组合为 $A_1B_2C_1$, 即弹簧劲度系数为 0.7 N/mm 、对侧接果板重叠宽度为 45 mm 、单侧接果板阵列间距为 100 mm 。对该组合进行 3 组试验取平均值得到其漏果面积为 $1\,036\text{ mm}^2$ 。

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Test plan and results

试验号	因素				漏果面积 (S_1+S_2)/ mm^2
	$A/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	B/mm	C/mm	D	
1	0.7	40	100	1	1 057
2	0.7	45	105	2	1 236
3	0.7	50	110	3	1 265
4	0.8	40	105	3	1 244
5	0.8	45	110	1	1 233
6	0.8	50	100	2	1 109
7	0.9	40	110	2	1 334
8	0.9	45	100	3	1 075
9	0.9	50	105	1	1 422
K_1	1 186.00	1 211.67	1 080.33	1 237.33	
K_2	1 195.33	1 181.33	1 300.67	1 226.33	
K_3	1 277.00	1 265.33	1 277.33	1 194.67	
R	91.00	84.00	220.33	42.67	

为进一步验证各因素对漏果面积的显著性影响,对试验数据进行了单因素方差分析,分析结果如表 5 所示。计算得到了 3 个主要因素及误差项的偏差平方和(SS)和 F 值,查 F 分布表得到在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,自由度 2 对应的临界值为 $F_{0.05}(2, 2)=19$ 。与之比较可知: $F_C=29.855>19$ 表明单侧接果板阵列间距对漏果面积的影响在 0.05 水平下显著;而 $F_A=5.107<19$ 与 $F_B=3.687<19$ 表明弹簧劲度系数 A 和对侧接果板重叠宽度 B 对漏果面积虽有一定影响,但未达到统计学显著性。这一结果与极差分析中得出的主次顺序一致,即单侧接果板阵列间距 C 的影响最为显著。此外误差项的平方和仅为 2 944.22,远小于各主要因素的平方和,说明试验误差较小。结合极差分析与方差分析并结合实际装配条件,最终确定出最佳参数组合为:弹簧劲度系数 0.7 N/mm 、对侧接果板重叠宽度 45 mm 、单

侧接果板阵列间距 100 mm 。

表 5 漏果面积方差分析
Tab.5 Results of variance analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	F	$F_{0.05}$	显著性
A	15 037.556	2	5.107	19	
B	10 856.222	2	3.687	19	
C	87 900.222	2	29.855	19	*
误差	2 944.22	2			

注: * 表示影响显著。

3.4 RecurDyn-EDEM 耦合集果仿真

为明确集果装置对于不同酿酒葡萄品种的集果效果,验证方案的合理性,利用 RecurDyn-EDEM 进行耦合仿真,以漏果率作为评价指标,进行仿真试验。

为建立准确的离散元模型,需要测定不同品种的几何特性参数,不同品种的外观如图 9 所示。本研究选择了小芒森、小味儿多、贵人香、马瑟兰、品丽珠、赤霞珠、白玉霓和熊岳白共 8 个典型酿酒葡萄品种进行试验,主要考虑以下两方面:一是上述品种均为目前我国北方酿酒葡萄主栽品种,种植面积广、产业应用价值高,具有代表性;二是不同品种果粒大小、果皮厚薄、机械强度等物理特性存在显著差异,能够充分反映不同果粒特性对集果装置性能的影响。因此,选取这 8 个品种既具有实际应用意义,也有助于验证装置适应性和推广潜力。采用游标卡尺测量果粒直径,测试样本随机选取适合采摘的成熟葡萄果粒,每个品种样本为 100 颗,对测量结果取平均值,如表 6 所示。本研究主要探究集果装置对果粒的收集效果,而果粒大小是决定果粒能否穿过间隙的重要因素,为简化分析过程,将果粒看作弹性球体,不考虑其内部损耗情况。基于此,不同葡萄品种之间的差异,通过果粒直径来体现,果粒的其他次要参数统一引用文献[14,20-22]。

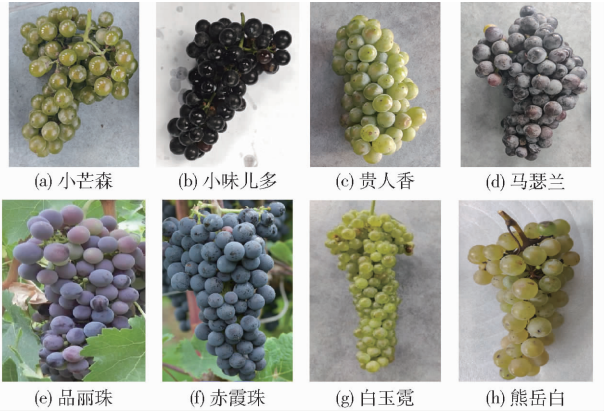


图 9 不同酿酒葡萄品种外观

Fig.9 Appearance of different wine grape varieties

将第 1.1 节建立的集果装置模型导入 EDEM 中,建立粒子作用边界^[23]。并根据不同零件与物料

表 6 不同酿酒葡萄品种果粒直径

Tab. 6 Fruit diameter of different wine grape varieties

品种	小芒森	小味儿多	贵人香	马瑟兰	品丽珠	赤霞珠	白玉霓	熊岳白
平均直径/mm	11. 9	12. 5	12. 6	13. 5	13. 6	13. 8	14. 9	17. 3

的特性对其相关参数进行设置,主要参数包括密度、泊松比、弹性模量、恢复系数、滚动摩擦因数等(表 7),其中硅胶板的参数由采购厂家提供。选用 Hertz - Mindlin 接触模型描述果粒与接果板的相互作用^[24]。

表 7 仿真模型基本参数

Tab. 7 Basic parameters of simulation model

参数	数值
果粒密度/(kg·m ⁻³)	1 130 ^[20]
果粒泊松比	0. 33 ^[21]
果粒弹性模量/MPa	13 ^[21]
碳纤维板密度/(kg·m ⁻³)	1 520 ^[22]
碳纤维板泊松比	0. 31 ^[22]
碳纤维板弹性模量/GPa	230 ^[22]
硅胶板密度/(kg·m ⁻³)	1 250
硅胶板泊松比	0. 48
硅胶板弹性模量/MPa	2. 14
果粒与硅胶板恢复系数	0. 637 ^[14]
果粒与硅胶板滚动摩擦因数	0. 45 ^[14]

为模拟果粒在集果装置中的运动行为,在集果装置上方设置颗粒工厂,用于生成葡萄果粒。根据仿真需求,设置颗粒生成的类型、总量以及运动状态参数,如图 10 所示。由于酿酒葡萄果粒在脱粒过程中的实际运动轨迹复杂且难以预估,因此设置颗粒工厂的虚拟平面仅覆盖高风险漏果区的宽度,只模拟果粒下落至漏果风险区,详细方法说明见 4. 1 节试验方法。对 RecurDyn 和 EDEM 进行协同仿真环境配置,将 EDEMV1_1_0. xml 导入至 RecurDyn Install Path,在 EDEM 中设置相关参数,两个软件设置统一的时间步长后进行仿真^[25]。

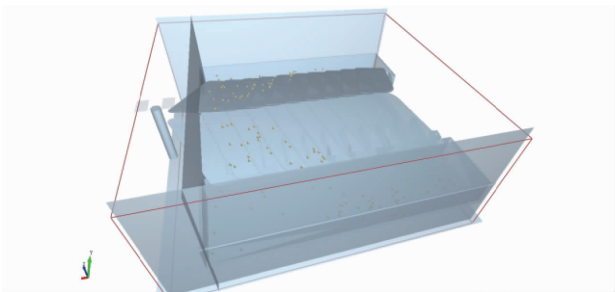


图 10 集果仿真模型

Fig. 10 Fruit-gathering simulation model

仿真结束后,通过设置区域筛选,查看颗粒漏损情况,统计相应个数,进而计算漏果率 α ,计算式为

$$\alpha = \frac{n}{N} \times 100\%$$

(6)

式中 n ——漏果数,个
 N ——总果粒数,个
通过仿真试验得到不同品种的漏果率,如表 8 所示。

表 8 耦合集果仿真结果

Tab. 8 Coupled fruit-gathering simulation results

品种	总果粒数/个	漏果数/个	漏果率/%
小芒森	200	32	16. 00
小味儿多	200	31	15. 50
贵人香	200	28	14. 00
马瑟兰	200	27	13. 50
品丽珠	200	27	13. 50
赤霞珠	200	24	12. 00
白玉霓	200	22	11. 00
熊岳白	200	16	8. 00

仿真结果表明(表 8),不同葡萄品种在集果过程中的漏果率存在显著差异。总体趋势显示,果粒直径较小的葡萄品种,其漏果率较高,而果粒直径较大的品种则表现出较低的漏果率。小芒森、小味儿多、贵人香等小粒径品种(直径 11. 9 ~ 12. 6 mm),其漏果率分别为 16. 00%、15. 50% 和 14. 00%。由于果粒粒径较小,更容易通过集果装置边缘或接缝区域的缝隙滑落,导致漏果现象相对严重。马瑟兰、品丽珠、赤霞珠等中等粒径品种(直径 13. 5 ~ 13. 8 mm)漏果率分别为 13. 50%、13. 50% 和 12. 00%,较小粒径品种漏果率有明显降低。白玉霓、熊岳白等大粒径品种(直径 14. 9 mm 和 17. 3 mm),其漏果率分别为 11. 00% 和 8. 00%。较大的粒径增加了果粒与接果板的接触面积,减少了漏落几率,同时也更容易被集果装置捕捉并导向输送装置。

4 集果试验与结果分析

4. 1 试验条件与方法

基于前期结构设计与关键部件的仿真优化,加工出酿酒葡萄集果输送装置试验样机,如图 11a 所示,进行集果性能试验,并对仿真试验的正确性进行验证。试验于 2024 年 8—9 月在山东省烟台市瀑拉谷酒庄进行,试验所用酿酒葡萄采样自酒庄。在收获机实际作业过程中,果粒的下落轨迹十分复杂,难以确定,在漏果试验时难以模拟全部果粒的下落情况,因此本研究先对可能发生漏果现象的漏果风险区进行试验,得到该区域的漏果率后,再换算成整机的漏果

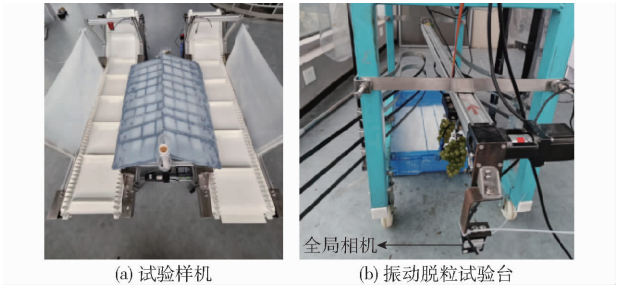


图 11 试验场景
Fig. 11 Test scenarios

率,具体的换算方法如下:

(1)确定漏果风险区域,在集果过程中,只有接果板与葡萄藤接触后形成间隙的中间区域存在漏果风险,其他区域不会漏果,该区域的宽度与葡萄藤的直径有关,如图 5b 中 GH 的距离。在理想情况,如果葡萄藤垂直笔直生长,该区域的最大宽度为最大葡萄藤直径 d (40 mm)。但是由于在实际的果园环境中,葡萄藤是弯曲的,导致葡萄藤与接果板接触的地方会发生左右偏移,导致该区域变宽。因此对果园中接果板所在高度的葡萄藤左右偏移进行测量(图 12a),测量偏移时以两端立柱支架的中心连线为中心线,取样 100 株葡萄藤,得到左右偏移量均值为 $p = 30.15\text{ mm}$,为了便于设计该值取整为 30 mm,计算风险漏果区域宽度 $W = 100\text{ mm}$ 。

(2)确定漏果风险区域的果粒分布比例,先借助实验室设计的酿酒葡萄振动脱粒试验台^[26](图 11b)统计在振动脱粒过程中果粒落在漏果风险区(图 12b)的果粒数 N_1 与总果粒数 N 的比值,即漏果风险区分布比例 φ 。然后试验统计本样机在漏果风险区的漏果率 α_1 ,最后通过漏果风险区分布比例换算得到整体漏果率,其计算式为

$$\alpha_1 = \frac{n}{N_1} \times 100\% \tag{7}$$

$$\varphi = \frac{N_1}{N} \tag{8}$$

由式(6)~(8),整理得

$$\alpha = \alpha_1 \varphi \tag{9}$$

通过果粒落点分布标定试验确定漏果风险区分布比例,借助酿酒葡萄振动脱粒试验台,使用全局相机对其工作过程中果粒下落的轨迹进行拍摄,并于下方铺满面粉以标记落点位置(图 12c)。对赤霞珠、马瑟兰和品丽珠等 8 个品种进行漏果风险区分布比例统计试验,每个品种进行 3 次重复试验,并统计得到各品种漏果风险区分布比例 φ ,结果表明不同品种漏果风险区分布比例均小于 15%。

对样机的漏果风险区搭建集果试验装置,在集果装置下方安装同步带滑台,滑台上方固定 PVC 管以

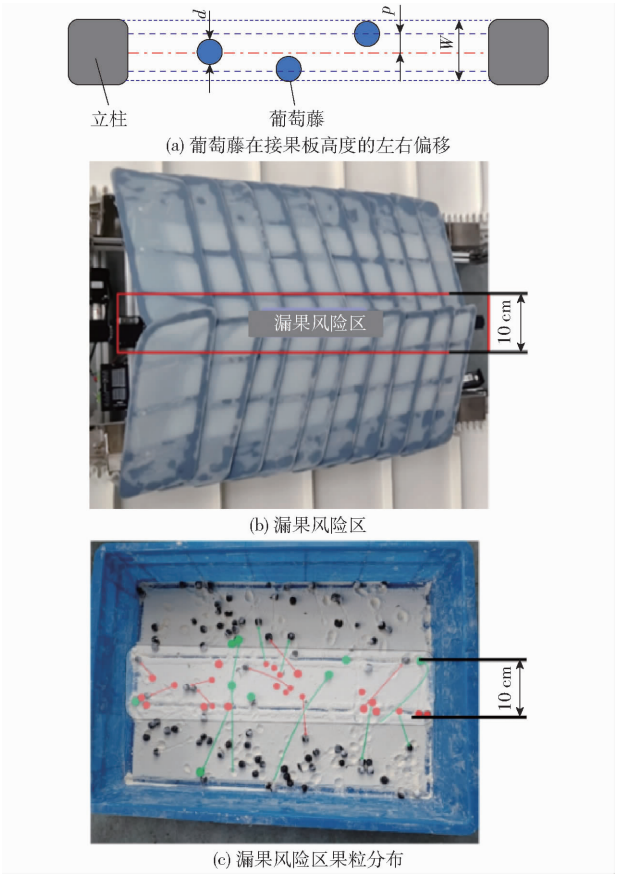


图 12 漏果风险区域

Fig. 12 Fruit leakage risk area

模拟葡萄藤跨行作业,在 PVC 管上方安装漏斗,作为喂料口,将果粒经过喂料漏斗释放到漏果风险区,PVC 管直径与仿真试验采用的 40 mm 保持一致。在实际作业过程中,集果装置收集到的果粒是受到振动脱粒部件振动后掉落的,这些果粒会发生破损,不同品种的破损率不同。为保证漏果率在与实际相符的情况下测得,试验所用的葡萄果粒取自经过振动脱粒试验台脱粒得到的果粒。对小芒森等 8 个品种分别进行集果试验,每个品种重复进行 5 次,试验过程中记录试验前颗粒总数及未被有效收集的漏果数量,依据试验统计结果,计算漏果风险区的漏果率 α_1 ,结合漏果风险区分布比例 φ ,从而换算整机漏果率 α 。

4.2 结果分析

对集果试验结果进行统计,每个品种试验结果取平均值,将表 8 仿真漏果率经过 4.1 节的换算方法得到仿真整机漏果率(表 9)。结合表 6 所列的果粒直径,结果表明样机集果装置整机漏果率平均值小于 4%,最大值为白玉霓品种(5.81%),最小值为熊岳白品种(3.19%)。

如图 13 所示,漏果率与果粒直径整体呈负相关,但是白玉霓和小味儿多两个品种由于其果粒容易破损,经过振动脱粒试验台脱粒后破损率较高,导致果粒掉落至接果板上,难以滚落至输送装置,从而受到

表 9 集果试验结果

Tab.9 Fruit-gathering test results %

葡萄品种	风险区漏果率	整机漏果率	仿真整机漏果率
小芒森	24.56	3.68	2.40
小味儿多	28.88	4.33	2.33
贵人香	24.17	3.63	2.10
马瑟兰	23.43	3.51	2.03
品丽珠	22.27	3.34	2.03
赤霞珠	22.59	3.39	1.80
白玉霓	38.73	5.81	1.65
熊岳白	22.23	3.19	1.20
平均值	25.86	3.86	1.94

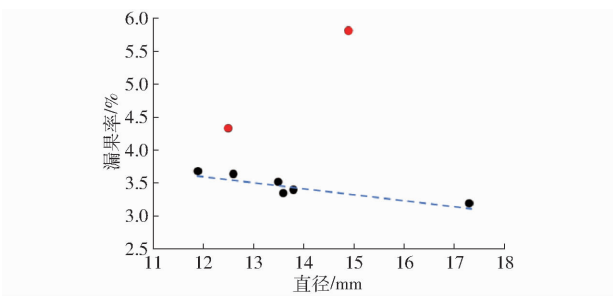


图 13 果粒直径与整机漏果率关系

Fig.13 Relationship between fruit diameter and overall fruit loss rate

接果板的挤压而彻底破裂无法收集。仿真试验值与实际试验值的误差值最大为 4.16%，仿真试验与实际试验的误差来源主要是仿真时果粒采用的是球体代替果粒，但是在台架试验中所用的葡萄是经过振动脱粒得到的，这些葡萄部分发生破损，当破损率较高

时仿真试验与台架试验的误差也较高，如白玉霓品种。

5 结论

(1)结合酿酒葡萄果粒特性与集果需求，设计了低漏损鱼鳞式接果板与集果装置，并分析了导致漏果的原因。分析发现影响漏果面积的主要因素为葡萄藤直径、接果板形状参数、单侧接果板阵列间距、对侧接果板重叠宽度和弹簧劲度系数。

(2)建立了集果装置的动力学仿真模型，分析了其运动过程。在形状优化和单因素试验的基础上以漏果面积为评价指标，进行了弹簧劲度系数、对侧接果板重叠宽度、单侧接果板阵列间距和空白组的四因素三水平正交试验，得到前 3 个因素分别取 0.7 N/mm、45 mm、100 mm 时漏果面积最小，为 1 036 mm²。此外还建立了 RecurDyn – EDEM 耦合仿真模型，对多个品种进行了仿真集果试验，结果表明集果装置具有较低的漏果率，验证了方案的可行性。

(3)研制了集果装置样机，并进行了集果试验。通过果粒落点分布标定试验得到漏果风险区的果粒分布比例 φ 小于 15%。集果试验结果表明，装置对多个品种漏果率平均值小于 4%，最大值为白玉霓品种(5.81%)，最小值为熊岳白品种(3.19%)，证明该集果装置有较好的集果性能。漏果率与果粒直径整体呈负相关关系，且果粒破损越严重漏果率越高。仿真试验值与实际试验值的最大绝对误差为 4.16%，证明模型具有较好的准确性。

参 考 文 献

[1] 李超,邢洁洁,徐丽明,等.酿酒葡萄篱架梳脱运动试验台设计与应用[J].农业机械学报,2017,48(2):98–103.
Li Chao, Xing Jiejie, Xu Liming, et al. Design and experiment of wine grape trellis traveling stripping platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2):98–103. (in Chinese)

[2] 耿智化,许钰,邹利,等.酿酒葡萄收获机研究进展综述[J].南方农机,2019,50(15):62–64.
Geng Zhihua, Xu Yu, Zou Li, et al. Review on research progress of wine grape harvesters[J]. South Agricultural Machinery, 2019, 50(15): 62–64. (in Chinese)

[3] 李成松.酿酒葡萄振动分离机理及装置的研究[D].北京:中国农业大学,2015.
Li Chengsong. Study on the vibration separation mechanism and equipment of wine grape[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[4] 吴清分. NewHolland 公司 BRAUD9090X 型葡萄收获机[J].农业工程,2016,6(6):4–6.
Wu Qingfen. BRAUD9090X type grape harvesting machine of NewHolland company[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(6): 4–6. (in Chinese)

[5] 党永强.酿酒葡萄收获机圆环链集果输送装置的研究[D].石河子:石河子大学,2018.
Dang Yongqiang. Research of wine grape harvester conveying device based on round link chain[D]. Shihezi: Shihezi University,2018. (in Chinese)

[6] 杨兰涛,王丽红,坎杂,等.4PZ-1 型自走式酿酒葡萄收获机的研制与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):38–44.
Yang Lantao, Wang Lihong, Kan Za, et al. Development and test of 4PZ-1 self-propelled wine grape harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 38–44. (in Chinese)

[7] Novák P, Burg P. Evaluation of harvest losses within a full mechanised grape harvest[J]. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2013, 61(3): 751–756.

[8] Takeda F, Wolford S D. Berry catcher system; US9750188B2[P/OL]. 2017-09-05. <https://patents.google.com/patent/US9750188>.

[9] Kok T S, Roberts K M. Berry harvester; AU2021204098A1[P/OL]. 2022-01-20. <https://patents.google.com/patent/AU2021204098A1>

AU2021204098A1.

[10] Sargent S A, Takeda F, Williamson J G, et al. Harvest of southern highbush blueberry with a modified, over-the-row mechanical harvester; use of handheld shakers and soft catch surfaces[J]. Agriculture, 2019, 10(1): 4.

[11] Sargent S A, Takeda F, Williamson J G, et al. Harvest of southern highbush blueberry with a modified, over-the-row mechanical harvester; use of soft-catch surfaces to minimize impact bruising[J]. Agronomy, 2021, 11(7): 1412.

[12] 鲍玉冬, 杨闯, 赵彦玲, 等. 基于碰撞变形能的机械采收蓝莓果实碰撞损伤评估[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 283 – 292.

Bao Yudong, Yang Chuang, Zhao Yanling, et al. Collision injury assessment of mechanical harvesting blueberry fruit based on collision deformation energy[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 283 – 292. (in Chinese)

[13] 党永强, 李成松, 杨兰涛, 等. 酿酒葡萄收获机收集输送装置的设计与理论分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 251 – 256.

Dang Yongqiang, Li Chengsong, Yang Lantao, et al. Research on the design of conveyor for wine grape harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 251 – 256.

[14] 李超. 基于柔性梳脱的酿酒葡萄脱粒机理与装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

Li Chao. Research on the threshing mechanism and device of wine grapes based on flexible combing and threshing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[15] 马帅, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 葡萄果实碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 180 – 186.

Ma Shuai, Xu Liming, Xing Jiejie, et al. Study on collision damage experiment of grape and finite element analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(11): 180 – 186. (in Chinese)

[16] 赵翔烽, 颜华, 别琼, 等. 基于 EDEM – RecurDyn 的移栽机取苗爪取苗仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 197 – 206.

Zhao Xiangfeng, Yan Hua, Bie Qiong, et al. Calibration of seedling pot particle parameters and simulation and experimentation of seedling picking claw based on EDEM – RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 197 – 206. (in Chinese)

[17] 张红梅, 张晨明, 李志杰, 等. 基于 EDEM – RecurDyn 的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 36 – 46.

Zhang Hongmei, Zhang Chenming, Li Zhijie, et al. Simulation analysis and optimization of vibration characteristics of corn finger clip seeding device based on EDEM – RecurDyn coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 36 – 46. (in Chinese)

[18] 沈聪聪, 马帅, 谭好超, 等. 基于多柔体动力学的葡萄挑藤机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 24 – 33.

Shen Congcong, Ma Shuai, Tan Haocao, et al. Parameter optimization and experiment of grapevines picking-up mechanism using multi-flexible-body dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 24 – 33. (in Chinese)

[19] 谭好超, 徐丽明, 马帅, 等. 刮板式有机肥条铺与旋耕混合施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 163 – 175.

Tan Haocao, Xu Liming, Ma Shuai, et al. Design and experiment of scraper organic fertilizer strip spreading and rotary tillage mixed fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 163 – 175. 2022. (in Chinese)

[20] Coetzee C J, Lombard S G. The destemming of grapes; experiments and discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 232 – 248.

[21] Zu H, He K, Liu W, et al. Interaction properties of wine grapes; DEM analysis and experimental investigation[J]. Journal of Food Engineering, 2025, 387: 112347.

[22] 冯年. 碳纤维复合材料的平板结构和连接结构力学性能-仿真优化[D]. 福州: 福建师范大学, 2023.

Feng Nian. Mechanical properties and simulation optimization of flat plate and joint structures of carbon fiber composite[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023. (in Chinese)

[23] 赫明胜. 酿酒葡萄分层旋抛清土机理与旋抛-气吹复式清土起藤机研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.

He Mingsheng. Research on the mechanism of layered rotary throwing and soil removal and the rotary throwing air blowing compound soil cleaning machine for wine grape[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)

[24] 蒋永新, 曲衡, 刘旋峰, 等. 残膜回收机铲齿式起膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 282 – 289.

Jiang Yongxin, Qu Heng, Liu Xuanfeng, et al. Design and simulation of spade tooth film lifting device for residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 282 – 289. (in Chinese)

[25] 胡建平, 潘杰, 陈凡, 等. 基于 EDEM – RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 75 – 85, 301.

Hu Jianping, Pan Jie, Chen Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM – RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75 – 85, 301. (in Chinese)

[26] Zhou H, Tan H, Shen C, et al. Vibratory threshing mechanism and multi-species threshing parameter testing of wine grapes based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110955.