

酿酒葡萄整穗收获机气力式除杂装置设计与试验

李培勇¹,彭慧杰¹,王铎¹,李佳豪¹,蒙贺伟¹,周多进^{2*}

(1 石河子大学机械电气工程学院,新疆石河子 832003;2 新疆张裕巴保男爵酒庄有限公司,新疆石河子 832099)

摘要:针对酿酒葡萄整穗收获机收获过程中含杂率较高的问题,设计酿酒葡萄气力式除杂装置并进行参数组合优化。采用双喷嘴异向气流协同作用进行果叶分离,以提升对不同位置果叶的除杂效率。运用响应曲面试验设计方法,以主、副喷嘴风速、喂入速度、主喷嘴角度为试验因素,以除杂率、损失率为评价指标,开展四因素三水平试验,结果表明:除杂率主次影响因素为主喷嘴风速>主喷嘴角度>喂入速度>副喷嘴风速;损失率主次影响因素为主喷嘴风速>副喷嘴风速>喂入速度>主喷嘴角度。以除杂率最高、损失率最低进行除杂装置最佳作业参数优化,确定的最佳参数组合如下:主、副喷嘴风速为 $16.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $13.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,喂入速度为 $140 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,主喷嘴角度为 8° ;采用多项式回归模型预测的除杂率为 90.99%,损失率为 0.67%,采用优化后的参数进行试验得出的平均除杂率为 89.35%,损失率为 0.71%;以上参数组合可为酿酒葡萄及其相关作物的除杂装置提供技术依据。

关键词:酿酒葡萄;除杂;气力式装置;喷嘴;整穗收获

中图分类号:S226.5

文献标志码:A

Design and experiment of pneumatic impurity removal device for cluster harvester of wine grapes

LI Peiyong¹, PENG Huijie¹, WANG Duo¹, LI Jiahao¹, MENG Hewei¹, ZHOU Duojin^{2*}

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2 Chateau Changyu Baron Balboa Co., Ltd. Xinjiang, Shihezi, Xinjiang 832099, China)

Abstract: To address high impurity levels in machine-harvested wine grape clusters, a pneumatic cleaning device was developed and optimized. Dual-nozzle counter airflow improves fruit-leaf separation efficiency. A four-factor, three-level response surface design was applied, testing main nozzle velocity, secondary nozzle velocity, feed rate, and nozzle angle, with impurity removal rate and loss rate as evaluation criteria. Results showed the main factors affecting removal rate were main nozzle velocity>nozzle angle>feed rate>secondary nozzle velocity, while for loss rate the order was main nozzle velocity>secondary nozzle velocity>feed rate>nozzle angle. Optimization for maximum removal and minimum loss yielded an optimal combination: main nozzle velocity $16.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, secondary nozzle velocity $13.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, feed rate $140 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, and nozzle angle 8° . Predicted removal and loss rates were 90.99% and 0.67%, respectively, with experimental results averaging 89.35% and 0.71%; The combination of the above parameters provides a technical basis for cleaning devices in wine grape and related crop processing.

Key words: wine grapes; impurity removal; pneumatic device; nozzle; cluster harvesters

新疆维吾尔自治区人民政府公报《关于加快推进葡萄酒产业发展的指导意见》指出:到2030年全区酿酒葡萄种植面积力争达到 $1.06 \times 10^5 \text{ hm}^2$,力争酿酒产量达到1.5亿L^[1]。截至2023年,新疆酿酒葡萄种植面积达 $2.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,约占全国总面积的25%,葡萄酒年产量为0.12亿L,占全国总产量的

24.5%,是我国最大的葡萄原酒生产基地^[2]。新疆林果产业发展的政策优势明显,加之地域条件适宜,葡萄规模化、产业化发展前景良好。为满足高端葡萄酒的酿制,酿酒葡萄通常需要进行整穗采收,目前主流的采收方式主要有人工采收和机械采收,人工采收能够最大程度保证果穗的完整性

收稿日期:2025-10-16

基金项目:新疆生产建设兵团科技计划项目(2022DB004,2024AB042,2024BA005-3)

作者简介:李培勇(2001—),男,硕士研究生,专业方向为农业机械化工程,e-mail:3327182729@qq.com。

*通信作者:周多进(1974—),男,农艺师,从事果树栽培、育种与新技术推广方向的研究,e-mail:zhou2024@163.com。

与品质,但存在劳动强度大,效率低及成本高的问题。机械采收可分为振动式、气力式、剪切式、梳刷式等^[3],虽能显著提高采收效率,降低用工成本,但普遍存在收后酿酒葡萄含杂率较高^[4],必要时需增加清选除杂工序,从而延长酿酒葡萄采摘至加工的时间,不仅葡萄酒品质难以保证,还可能降低经济效益。

针对现存酿酒葡萄及其相关作物收获机收后含杂率较高的问题,国内外学者对清选分离装置作业机理^[5-7]、关键部件参数等方面开展了相关研究。Myhan等^[8]构建了清选设备内谷物分离的运动学模型,深入研究秸秆与谷物之间的分离机制;Pieper等^[9]运用DEM-CFD方法,针对光学分选系统在颗粒检测与分离阶段之间的延迟问题,通过数值建模验证了模型的可行性,结果显示在复杂的分选条件下仍能保持分选优势;Chen^[10]针对气力式红枣收获机作业效率低的问题,提出正负压气流采集红枣和利用惯性气流除杂的方法,相比传统的气动红枣捡拾,作业效率得到显著提高;Ren等^[11]设计了一种小型气动榛子采收机,综合应用气固两相流理论对榛子的采收过程进行模拟分析,确定最优作业参数;马秋成^[12]依据莲壳与莲仁的空气动力学特性设计了一种针对莲子的负压式壳仁分离设备,使用过程中发现壳与仁之间的悬浮速度存在重叠区间而难以实现彻底分离;孙周盛等^[13]为提高切段式甘蔗收获机除杂效

率,运用CFD数值计算方法,对除杂室进行结构优化,优化后的除杂风机内流场稳定性显著提高;尹晓宇^[14]进行了蓝靛果气力式清选装置的设计与试验,清选率为98.73%,损失率为1.93%,能够满足生产需求。

综上所述,国外关于除杂装置的研究多集中于数值模拟、清选模型构建等方面,而国内的研究多集中于具体的工程化应用及表皮不易损伤的作物,且受地域性因素影响,目前针对浆果类等表皮易损伤作物的收后除杂装置研究仍较为缺乏,特别是针对酿酒葡萄的相关技术鲜有报道,因此,本研究团队通过企业调研及前期试验,研发酿酒葡萄整穗收获机^[15],本文基于该收获机进行除杂装置的优化研究,旨在为浆果类除杂装置结构改进和参数优化提供参考。

1 结构与工作原理

1.1 总体结构

酿酒葡萄整穗收获机气力式除杂装置主要包括上料装置、输送装置、风力调节机构、喷嘴调整机构、控制柜及机架等部分,其结构示意图如图1所示。其中上料和输送装置包括物料输送带、电机、机架等,风力调节机构包括风速调节阀、风机、管道等,喷嘴调整机构分为主、副喷嘴调整机构,控制柜包括变频器和显示屏等。

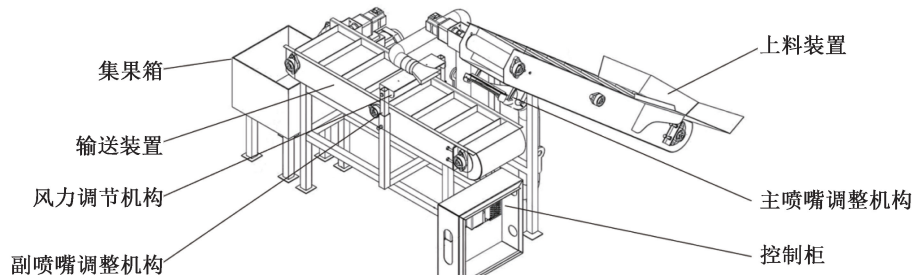


图1 除杂装置结构示意图

Figure 1 Structure diagram of impurity removal device

1.2 工作原理

本研究团队研发的酿酒葡萄整穗收获机主要工作原理如下:切割装置采摘酿酒葡萄(具体流程为:梳齿部件进行酿酒葡萄果串的生长姿态调整,使果串悬垂于地面,之后由切割装置完成采摘),采摘之后的酿酒葡萄经一级传送装置运送除杂,经除杂后的酿酒葡萄果串由二级传送装置输送至集果箱,至此完成酿酒葡萄果串的采收。酿酒葡萄切割后的下一环节(输送-除杂-集果)总装结构示意图如图1所示。

酿酒葡萄整穗收获机除杂装置工作过程主要分

为送风过程、上料过程以及气力除杂过程。首先开启风机电源,通过变频器调节风机转速,风机产生的气流经过管道内的风速调节阀调节风速,经调速稳定之后的气流从主/副喷嘴射出。待除杂装置送风稳定之后,将酿酒葡萄混合物平铺于上料装置传送带前部(传送带后部预留送料稳定区),开启上料装置电源,通过变频器调节上料装置电机转速,混合物在传送带和刮板的作用下向上运输,在混合物到达传送带顶端时,混合物由传送带抛入气流场中,此时物料受到自身重力与气流的作用,物料会产生加速

度并开始进行斜抛运动。由于混合物中不同物料的密度和质量存在差异,在重力-气流作用下的速度也各不相同,进而会在斜抛运动过程中实现分离,比重较小的酿酒葡萄果叶在气流作用下吹出输送区域,比重较大的酿酒葡萄果串直接掉落到下方输送装置传送带上,由输送装置传送至集果箱,从而完成酿酒葡萄果叶的除杂工作。

2 酿酒葡萄除杂装置工作过程分析

酿酒葡萄混合物的悬浮速度在空气中受力沉降差异大,前期通过 WXS-1 农业物料悬浮试验台测得酿酒葡萄品种-雷司令的果叶和果粒的悬浮速度分别在 $4.0 \sim 5.1$ 、 $15.9 \sim 18.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,其悬浮速度与果叶面积和果粒三轴尺寸有一定关系;混合物经上料装置抛入气流场后,悬浮速度小的酿酒葡萄果叶被吹出输送区域,悬浮速度大的酿酒葡萄果串、果粒下落至输送装置中完成分离。但是混合物中果叶与果串的不同位置会对除杂效果产生影响,所以对“果-叶”不同位置在气流场中的运动过程进行分析,探究“果-叶”在不同位置时的分离条件,为除杂装置结构工作参数提供参考。果-叶不同位置包括果-叶互不干涉、全部或部分果叶位于果串的后方、全部或部分果叶位于果串的下方。

2.1 单一喷嘴作用下果叶运动分析

2.1.1 “果-叶”斜抛运动分析

当果串与果叶互不干涉时,果叶单独进入气流场中,果叶受到主喷嘴气流作用,当果叶所受气流速度大于悬浮速度时,可完成分离,由此对果叶分离过程进行运动分析,建立坐标系,以果叶位于空间中任一点为原点 O ,水平方向为 X 轴,垂直方向为 Y 轴(图 2)。

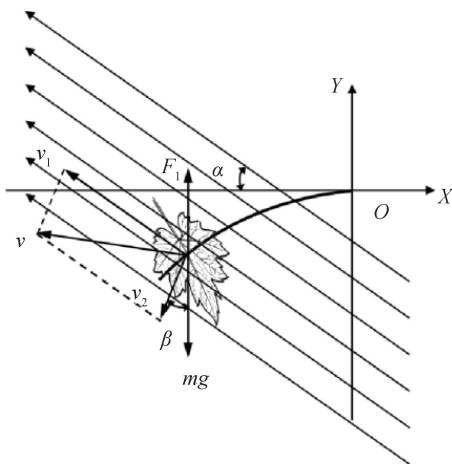


图 2 单一喷嘴作用下果叶受力分析
Figure 2 Analysis of the force on fruit leaves under the action of a single nozzle

气流与水平夹角为 $\alpha (0^\circ \sim 90^\circ)$, 速度为 v_1 ; 果叶速度为 v_2 , 与重力方向夹角为 β , 绝对速度为 v 。将果叶简化成质量为 m 的薄片, v_1 为气流对果叶的速度, 则果叶相对速度 v_2 即为果叶的绝对速度与气流速度的向量差, 可得:

$$v_2 = v - v_1, \quad (1)$$

气流对果叶的垂直作用力 F_1 为:

$$F_1 = mKv_p^2 = mg, \quad (2)$$

式(2)中, F 为气流对果叶的作用力, N ; K 为物料飘浮系数; v_p 为果叶悬浮速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

气流对果叶的作用力为:

$$F = mKv_1^2 [16], \quad (3)$$

果叶受到主喷嘴气流作用力和重力影响, 对其受力情况建立动力学微分方程:

$$mKv_1^2 - mg = m \frac{dv}{dt}; \quad (4)$$

进一步处理可得:

$$\begin{cases} \frac{dv_y}{dt} = \frac{g}{v_p^2} v_y^2 \frac{v_{2y}}{v_y} - g, \\ \frac{dv_x}{dt} = \frac{g}{v_p^2} v_x^2 \frac{v_{2x}}{v_x}. \end{cases} \quad (5)$$

下文的参数为标量, 且“+、-”分别为与坐标轴相同、相反方向。

根据图 2 将 v_1 分解为水平方向和垂直方向速度:

$$\begin{cases} v_{1x} = v_1 \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = -v_1 \sin \alpha, \\ v_{1y} = v_1 \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = v_1 \cos \alpha; \end{cases} \quad (6)$$

由 v 、 v_2 和 v_1 之间的几何叠加关系可得:

$$\begin{cases} v_{2x} = v_x - v_{1x} = v_x + v_1 \sin \alpha, \\ v_{2y} = -(v_{1y} - v_y) = v_y - v_1 \cos \alpha; \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, v_x 为果叶绝对速度 v 的 x 轴分量; v_y 为果叶绝对速度 v 的 y 轴分量。

进一步可得果叶在 x 、 y 方向的加速度为:

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{g}{v_p^2} \sqrt{(v_x + v_1 \sin \alpha)^2 + (v_y - v_1 \cos \alpha)^2} \cdot (v_x + v_1 \sin \alpha), \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{g}{v_p^2} \sqrt{(v_x + v_1 \sin \alpha)^2 + (v_y - v_1 \cos \alpha)^2} \cdot (v_y - v_1 \cos \alpha) - g. \end{cases} \quad (8)$$

对上述斜抛运动方程分析可知:果叶在单喷嘴气流场的运动过程中,主要受到重力和主喷嘴气流作用力的影响,其中重力方向一直沿 y 轴竖直向下保持不变,果叶所受气流作用力主要由主喷嘴气流引起,这是影响果叶分离的主要因素;另外,果叶在单喷嘴气流中运动还与果叶速度 v_2 、气流方向角 α 和果叶速度与重力方向角 β 有关。

2.1.2 “果-叶”气力分离条件分析

当果叶与果串互不干涉时,果叶仅受到气流作用力和重力的作用。设果叶在主喷嘴方向的最小迎风面积为 S_1 ,主喷嘴方向的气流作用力为:

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 S_1 C_d \quad (9)$$

式(9)中, ρ 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_d 为空气阻力系数。

果叶在受到主喷嘴方向的气流作用力大于重力时被吹走,即:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 S_1 C_d \geq mg, \quad (10)$$

整理得果叶被吹走的临界气流速度为:

$$v_1 \geq v_L = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S_1 C_d}}. \quad (11)$$

当果叶位于果串后方时,主喷嘴气流经过果串后速度衰减,在果串背风侧产生了低速流动区,导致作用在果叶上的气流作用力减小。设气流经过果串后的速度为:

$$v'_1 = \delta v_1, \quad (12)$$

式(12)中, δ 为衰减系数, $0 < \delta < 1$ 。

则新的气流作用力为:

$$F'_1 = \frac{1}{2} \rho (\delta v_1)^2 S_1 C_d = \delta^2 F_1, \quad (13)$$

整理得新的临界气流速度为:

$$v_1 \geq v'_L = \frac{v_L}{\delta}, \quad (14)$$

由于 $\delta < 1$, 所以 $v'_L \geq v_L$, 即需要更大的风速才能将果叶吹走。当果-叶之间干涉过多时,出现部分果叶因气流作用力减弱无法被吹走,影响分离效果。为克服上述问题,考虑在主喷嘴气流垂直方向添加 1 个副喷嘴,以使果叶获得足够的气流作用力。

设果叶在副喷嘴方向的最小迎风面积为 S_2 ,副喷嘴方向的气流作用力为:

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 S_2 C_d, \quad (15)$$

2 个喷嘴的气流在果叶处叠加,合成的气流速度为:

$$v_i = v'_1 + v_2, \quad (16)$$

为使果叶被吹走,需满足

$$F_i = \frac{1}{2} \rho v_i^2 S C_d \geq mg, \quad (17)$$

式(17)中,果叶迎风面积 $S = S_1 + S_2 \approx S_1, S_2 \ll S_1$ 。

对上述建立的“果-叶”分离的力学方程分析可知:在单喷嘴气流场中,由于果串的遮挡效应,无法有效分离所有果叶,故添加第 2 个垂直方向的副喷嘴,采用异向对置的双喷嘴结构,使其产生的异向气流绕开果串的阻挡,直接作用在果叶上,从而显著提升果叶的分离效果。

2.2 主-副喷嘴协同作用下果叶运动分析

当果叶全部或部分处于果串下方时,果叶受到果串压力及主喷嘴气流作用力,果叶有沿气流方向运动的趋势,但受果串压力作用,果叶仍向下运动进入主-副喷嘴气流协同作用区,当果叶所受气流作用力克服果串压力获得横向加速度时,可完成分离。以空间中任一点为原点,建立 $OXYZ$ 空间坐标系(图 3),果叶受到主喷嘴方向气流作用力 F_1 ,副喷嘴方向气流作用力 F_2 ,果叶自身的重力 mg 以及果串的压力 F_N ,果叶与果串之间的摩擦力 f 。

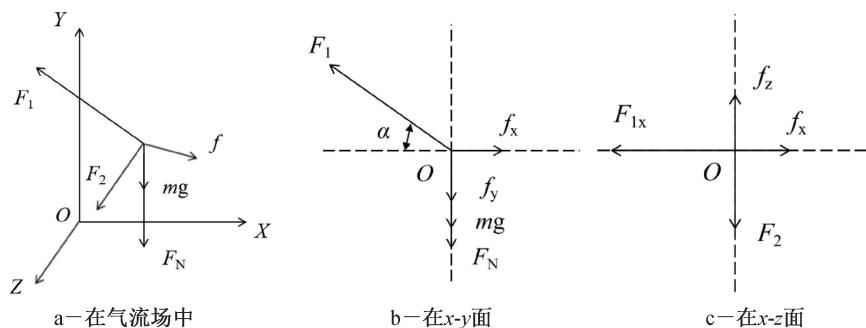


图 3 主-副喷嘴协同作用下果叶受力分析

Figure 3 Force analysis of fruit leaves under the synergistic effect of main-auxiliary nozzle

果叶在各方向的动力学方程为:

$$\begin{cases} F_{1x} - f_x = ma_x, \\ F_{1y} - f_y - mg - F_N = ma_y, \\ F_2 - f_z = ma_z; \end{cases} \quad (18)$$

将式(9)、式(15)代入得:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}\rho v_1^2 S_1 C_d \sin \alpha + f_x = -ma_x, \\ \frac{1}{2}\rho v_1^2 S_1 C_d \cos \alpha - f_y - mg - F_N = ma_y, \\ \frac{1}{2}\rho v_2^2 S_2 C_d - f_z = ma_z. \end{cases} \quad (19)$$

要使果叶分离,必须是果叶与果串之间的摩擦力不足以维持它们之间的相对静止,即果叶在某个方向上的加速度要足够大,使得摩擦力达到最大静摩擦力 f_{\max} 后,果叶仍能继续加速运动。假设最大静摩擦力 f_{\max} 与正压力 F_N 之间满足关系 $f_{\max} = \mu F_N$ (其中 μ 为摩擦系数)。在这种情况下,假定果叶被吹出以 z 轴方向为主方向,当摩擦力达到最大静摩擦力 f_{\max} 时,要使果叶分离,则有:

$$a_z = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \rho v_2^2 S_2 C_d - f_z \right) > 0, \quad (20)$$

即

$$\frac{1}{2} \rho v_2^2 S_2 C_d - f_{\max} > 0, \quad (21)$$

求解得:

$$v_2 > \sqrt{\frac{2f_{\max}}{\rho S_2 C_d}}; \quad (22)$$

在风速 v_1 已知的情况下,将相应的参数代入式(22),可得 $v_2 > 9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对果叶在各方向的动力学方程积分,可以计算出果叶在各方向上的运动速度及其位置坐标,果叶运动速度为:

$$\begin{cases} v_x(t) = v \sin \beta - \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \rho v_1^2 S_1 C_d \sin \alpha + f_x \right) t, \\ v_y(t) = v \cos \beta + \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \rho v_1^2 S_1 C_d \cos \alpha - f_y \right) t, \\ v_z(t) = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \rho v_2^2 S_2 C_d - f_z \right) t; \end{cases} \quad (23)$$

果叶的位置坐标为:

$$\begin{cases} x(t) = v \sin \beta t - \frac{1}{2m} \left(\frac{1}{2} \rho v_1^2 S_1 C_d \sin \alpha + f_x \right) t^2, \\ y(t) = v \cos \beta t + \frac{1}{2m} \left(\frac{1}{2} \rho v_1^2 S_1 C_d \cos \alpha - f_y \right) t^2, \\ z(t) = \frac{1}{2m} \left(\frac{1}{2} \rho v_2^2 S_2 C_d - f_z \right) t^2. \end{cases} \quad (24)$$

通过式(23)、式(24)可以得出果叶在气流场中任一瞬时的运动速度及位置坐标,经过分析得出主-副喷嘴协同作用下的气流场达到分离条件,因此除杂装置总体方案采用双喷嘴设计原理。另外,分析上述运动方程可知,果叶在气流场中运动时与主喷嘴气流速度 v_1 、副喷嘴气流速度 v_2 、气流方向角 α 、果串对果叶的压力 F_N 、果叶速度 v 、果叶速度与重力方向角 β 有关,故在后续试验中考虑上述因素对除杂装置试验指标的影响。

3 除杂装置田间试验

3.1 试验条件

本试验于 2024 年 9 月在石河子大学机电学院农业农村部西北农业装备重点实验室进行,试验物料采自新疆张裕巴保男爵酒庄试验田(采样当天天气良好,空气质量优),酿酒葡萄品种为雷司令,成熟度由合作单位园艺师依据实际生产情况确定。经统计,采集的果串长度均值为 129.45 mm,最大直径均值为 78.28 mm;果叶长度均值为 90.25 mm,面积均值为 114.45 cm^2 ;果粒与果叶的含水率均值为 73.22%、67.40%,对应密度分别为 1.075、0.428 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。为保证试验一致性,依据前期试验得出的混合物各组分质量占比,即酿酒葡萄果串、果粒、果叶和其它杂质在混合物中所占的质量百分比分别为 89.96%、2.46%、6.73%、0.85%,将酿酒葡萄混合物各组分混合均匀装袋,每袋混合物质量为 10 kg。

3.2 试验方案

3.2.1 试验方法

试验前调整上料装置的速度达到所需水平,将准备好的 10 kg 酿酒葡萄混合物平铺于上料装置前部,开启风机电源,根据所选参数将主/副喷嘴风速、导风板角度、主喷嘴角度等调整至所需参数水平,待其工作稳定后再开启上料装置将混合物抛入气流作用区,直到输送装置传送带上方无物料时试验结束。分别收集果箱中酿酒葡萄混合物和除杂装置侧方夹带排出的酿酒葡萄果粒,将集果箱内收集的物料进

行分拣,分别记录集果箱内葡萄、杂质和夹带损失果粒的质量。

3.2.2 试验评价指标

根据 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》、GB/T 25393—2010《葡萄栽培和葡萄酒酿制设备葡萄收获机试验方法》、DB13/T 912—2007《酿酒葡萄质量标准》等标准中的规范和方法,确定以除杂率(Y_1)和损失率(Y_2)作为试验指标。试验结束后,对集果箱中收集的所有酿酒葡萄和杂质分别进行称重,并收集除杂装置的侧方夹带出的葡萄果粒进行称重,每组试验重复 3 次,通过式(25)、式(26)分别计算 Y_1 和 Y_2 。

$$Y_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (25)$$

$$Y_2 = \frac{m_4}{m_3 + m_4} \times 100\%; \quad (26)$$

式(25)和式(26)中, m_1 为总杂质质量,g; m_2 为除杂后集果箱中杂质质量,g; m_3 为除杂后集果箱中酿酒葡萄质量,g; m_4 为吹出装置外酿酒葡萄果粒质量,g。

3.2.3 试验因素

为了更好地探究 2.2 节中分析的因素对除杂装置的除杂效果,确定影响酿酒葡萄除杂装置效果的

因素主要有主/副喷嘴风速(A/B)、喂入速度(C)和主喷嘴角度(D)。由于果串对果叶的压力 F_N 随其相对位置变化,具有随机性,试验过程中无法精确调控该值,此外,相较于该因素,其他因素具有较好的可控性且对除杂效果的影响相对较大。

在试验过程中,通过改变送风管道中的风力调节机构及风机转速来调整主/副喷嘴风速;改变上料装置电机转速进行混合物喂入速度调整;通过主喷嘴调整机构进行主喷嘴角度变换。试验因素水平见表 1。

表 1 试验因素水平

Table 1 Test factor level

水平	主喷嘴风速 $A/(m \cdot s^{-1})$	副喷嘴风速 $B/(m \cdot s^{-1})$	喂入速度 $C/(r \cdot min^{-1})$	主喷嘴角度 $D/^\circ$
-1	14.5	12.5	120	5
0	16	14	135	7.5
1	17.5	15.5	150	10

为了更好地探究各因素之间的交互作用,采用 Box-Behnken 响应曲面试验设计方法进行四因素三水平试验,通过试验结果分析不同因素单/交互作用对除杂装置作业性能的影响。采用试验优化方法简化试验,最终随机选取 27 组试验,为保证各组试验条件的一致性,除试验因素之外,其余试验条件保持不变。试验结果如表 2 所示。

表 2 试验方案与结果

Table 2 Test scheme and results

序号	试验因素和水平				评价指标		序号	试验因素和水平				评价指标	
	$A/(m \cdot s^{-1})$	$B/(m \cdot s^{-1})$	$C/(r \cdot min^{-1})$	$D/^\circ$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$		$A/(m \cdot s^{-1})$	$B/(m \cdot s^{-1})$	$C/(r \cdot min^{-1})$	$D/^\circ$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	0	0	88.787	0.417	15	0	-1	1	0	90.196	0.713
2	1	-1	0	0	89.996	1.122	16	0	1	1	0	89.982	0.859
3	-1	1	0	0	90.653	0.435	17	-1	0	-1	0	88.194	0.331
4	1	1	0	0	90.174	1.307	18	1	0	-1	0	88.467	0.993
5	0	0	-1	-1	86.873	0.687	19	-1	0	1	0	87.203	0.325
6	0	0	1	-1	86.751	0.733	20	1	0	1	0	91.496	1.065
7	0	0	-1	1	86.533	0.727	21	0	-1	0	-1	87.679	0.829
8	0	0	1	1	88.809	0.771	22	0	1	0	-1	88.352	0.859
9	1	0	0	-1	87.275	0.426	23	0	-1	0	1	89.834	0.881
10	1	0	0	-1	88.337	1.147	24	0	1	0	1	89.789	0.942
11	-1	0	0	1	87.979	0.389	25	0	0	0	0	90.802	0.551
12	1	0	0	1	90.312	1.236	26	0	0	0	0	90.463	0.533
13	0	-1	-1	0	87.836	0.618	27	0	0	0	0	90.578	0.582
14	0	1	-1	0	89.482	0.795							

3.3 试验结果与数据分析

3.3.1 方差分析

采用 Design-Expert. 13 软件对试验结果进行多元回归拟合分析,经显著性检验,剔除模型中不显著

因素项,建立各试验因素对除杂率和损失率的二次多项式回归模型,对试验结果进行方差分析,得到各试验因素对除杂率和损失率的该回归模型式(27)、式(28)和方差分析结果(表 3、表 4)。

$$Y_1 = 90.61 + 0.72A + 0.34B + 0.59C + 0.67D + 1.00AC + 0.60CD - 1.37C^2 - 1.78D^2, \quad (27)$$

$$Y_2 = 0.56 + 0.38A + 0.051B + 0.026C + 0.042AB + 0.096A^2 + 0.17B^2 + 0.15D^2. \quad (28)$$

由各试验因素对除杂率的方差分析结果(表 3)

可知: $P < 0.000 1$, F 值等于 12.57, 说明此回归模型极显著;其中 A 、 C 、 D 、 AC 、 C^2 、 D^2 对除杂率模型影响极显著, B 、 CD 对除杂率模型影响显著, AB 、 AD 、 BC 、 BD 、 A^2 、 B^2 对除杂率模型影响不显著;各试验因素对除杂率模型的主次影响为 $A > D > C > B$ 。

表 3 除杂率回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of the impurity removal rate regression model

方差来源	平方和	d	均方	F	P	S	方差来源	平方和	d	均方	F	P	S
模型	49.40	14	3.53	12.57	<0.000 1	**	CD	1.44	1	1.44	5.12	0.043 0	*
A	6.29	1	6.29	22.43	0.000 5	**	A^2	1.28	1	1.28	4.55	0.054 3	
B	1.40	1	1.40	5.00	0.045 1	*	B^2	0.000 1	1	0.000 1	0.000 2	0.988 5	
C	4.14	1	4.14	14.77	0.002 3	**	C^2	10.02	1	10.02	35.70	<0.000 1	**
D	5.32	1	5.32	18.95	0.000 9	**	D^2	16.96	1	16.96	60.41	<0.000 1	**
AB	0.712 3	1	0.712 3	2.54	0.137 1		残差	3.37	12	0.280 7			
AC	4.04	1	4.04	14.40	0.002 6	**	失拟项	3.31	10	0.330 8	11.13	0.085 2	
AD	0.403 9	1	0.403 9	1.44	0.253 5		纯误差	0.059 4	2	0.029 7			
BC	0.864 9	1	0.864 9	3.08	0.104 6		总和	52.77	26				
BD	0.128 9	1	0.128 9	0.459 2	0.510 8								

注: $P < 0.01$ (极显著)“**”, $0.01 \leq P < 0.05$ (显著)“*”, $P \geq 0.05$ (不显著); S 表示显著性(Significance); d 表示自由度(degree of freedom)。

由各试验因素对损失率的方差分析结果(表 4)可知:模型 $P < 0.000 1$, F 值等于 115.04, 说明此回归模型极显著,其中 A 、 B 、 A^2 、 B^2 、 D^2 对损失率模型

影响极显著, C 、 AB 对损失率模型影响显著, D 、 AC 、 AD 、 BC 、 BD 、 CD 、 C^2 对损失率模型影响不显著;各试验因素对损失率模型的主次影响为 $A > B > C > D$ 。

表 4 损失率回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of the loss rate regression model

方差来源	平方和	d	均方	F	P	S	方差来源	平方和	d	均方	F	P	S
模型	2.01	14	0.143 7	115.04	<0.000 1	**	CD	1.0E-06	1	1.0E-06	0.000 8	0.977 9	
A	1.72	1	1.72	1 378.94	<0.000 1	**	A^2	0.049 3	1	0.049 3	39.48	<0.000 1	**
B	0.031 7	1	0.031 7	25.39	0.000 3	**	B^2	0.152 6	1	0.152 6	122.15	<0.000 1	**
C	0.008 3	1	0.008 3	6.62	0.024 4	*	C^2	0.003 1	1	0.003 1	2.49	0.140 3	
D	0.005 9	1	0.005 9	4.68	0.051 3		D^2	0.120 7	1	0.120 7	96.58	<0.000 1	**
AB	0.007 0	1	0.007 0	5.58	0.035 9	*	残差	0.015 0	12	0.001 2			
AC	0.001 5	1	0.001 5	1.22	0.291 5		失拟项	0.013 8	10	0.001 4	2.24	0.347 9	
AD	0.004 0	1	0.004 0	3.18	0.100 0		纯误差	0.001 2	2	0.000 6			
BC	0.000 2	1	0.000 2	0.192 3	0.668 8		总和	2.03	26				
BD	0.000 2	1	0.000 2	0.192 3	0.668 8								

注: $P < 0.01$ (极显著)“**”, $0.01 \leq P < 0.05$ (显著)“*”, $P \geq 0.05$ (不显著); S 表示显著性(Significance); d 表示自由度(degree of freedom)。

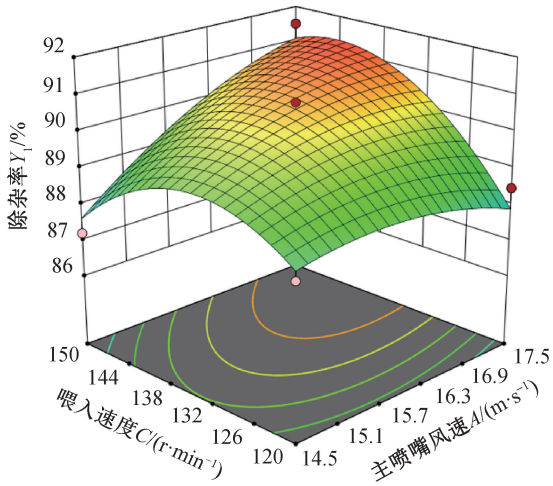
3.3.2 响应曲面分析

(1) 试验因素对除杂率的影响。

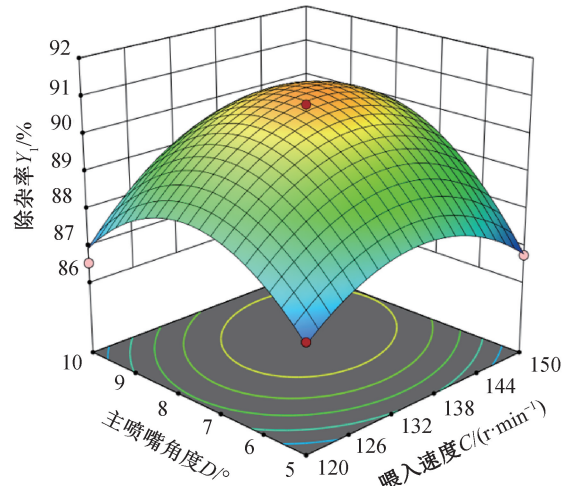
由回归方程与方差结果(表 3)分析可知, AC 、 CD 的交互作用对除杂率 Y_1 影响显著,其响应曲面如图 4 所示。

由图 4a 可知:当主喷嘴风速处于较低水平时,随着喂入速度的增加,除杂率呈先升高再降低的趋势;原因是当主喷嘴风速较低时,气流对混合物的作用力较弱,喷嘴无法彻底吹走果叶等杂质,随着喂入速度的增加,混合物抛出时初速度增大,水平方向的

位移增大,混合物刚好落入气流高速区(区间为主、副喷嘴气流交汇区,距离主喷嘴水平距离 0~25 cm,此时的气流速度 $\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,远大于果叶的悬浮速度),从而提升了除杂率;但喂入速度过大时,随着果叶水平方向位移增大,脱离气流高速区,导致除杂率降低。而当主喷嘴风速处于较高水平时,随着喂入速度的增加,除杂率逐渐升高;其原因是当主喷嘴风速较高时,喷嘴产生的气流速度大于果叶的分离速度,随着喂入速度增大,果叶水平方向位移增大,混合物中的果叶等杂质易被吹出,除杂率升高。



a—主喷嘴风速与喂入速度对除杂率的影响



b—喂入速度与主喷嘴角度对除杂率的影响

图 4 各因素交互作用对除杂率的影响

Figure 4 The effect of the interaction of various factors on the impurity removal rate

当喂入速度处于较低水平时,随着主喷嘴风速的增加,除杂率基本保持不变;原因是当喂入速度处于较低水平时,混合物水平方向的位移较小,脱离气流作用区(大致作用范围在以主喷嘴出风口中心为原点,辐射角度为 $0\sim 30^\circ$,垂直向上 6 cm 左右,水平沿出风口方向 25 cm 左右,作用跨度为沿副喷嘴轴线方向 $\pm 12\text{ cm}$),导致除杂率变化较小。而当喂入速度处于较高水平时,随着主喷嘴风速的增加,除杂率逐渐增大;其原因是当喂入速度处于较高水平时,混合物抛出时初速度增大,水平方向的位移增大,使得混合物中的果叶受到气流作用被吹出,除杂率上升。

由图 4b 可知:主喷嘴角度一定时,随着喂入速度的增加,除杂率呈先升高再降低的趋势;原因是当主喷嘴角度一定时,气流作用区域固定,根据输送带混合物的运动分析可知,喂入速度增大,果叶抛出时初速度增大,水平方向的位移增大,果叶刚好落入气流作用区,则果叶受到的气流作用力增大,从而提升了除杂率。但当喂入速度过大时,随着果叶水平方向位移增大,脱离气流作用区,导致除杂率降低。

当喂入速度一定时,随着主喷嘴角度的增加,除杂率呈先升高再降低的趋势;原因是当喂入速度一定时,果叶水平方向的位移固定在一定范围内,随着主喷嘴角度增加,果叶在水平方向上受到的风力减小,导致果叶在除杂装置内运动时被抛出的水平距离减小,高度增加,加大了果叶在气流场中运动的时间,从而增加了除杂装置的除杂率。而当主喷嘴角度过大时,果叶在水平方向受到的气流作用过小,果叶在水平方向的位移小于输送传送带的宽度,导致

除杂率降低。

(2) 试验因素对损失率的影响。

由回归方程与方差结果(表 4)分析可知,AB 的 P 值小于 0.05,得到 AB 的交互作用对损失率 Y_2 影响显著,其响应曲面如图 5 所示。

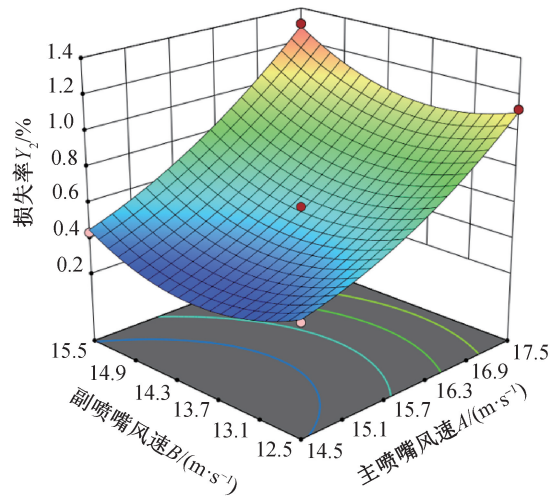


图 5 主喷嘴风速与副喷嘴风速对损失率的影响

Figure 5 The influence of main nozzle wind speed and auxiliary nozzle wind speed on the loss rate

由图 5 可知:当主喷嘴风速一定时,随着副喷嘴风速的增加,损失率呈先降低再升高的趋势;其原因是主喷嘴风速一定时,果粒受到主喷嘴气流作用力一定,随着副喷嘴风速增大,果粒受到主/副喷嘴气流合作用力趋势呈先减小后增大,同时水平方向的位移逐渐减小,散落的果粒及小果串不易被吹出,从而损失率降低。而当副喷嘴风速过大时,果粒受到的主/副喷嘴气流合力方向与副喷嘴气流方向角度减小,导致散落果粒沿副喷嘴气流方向被抛出,导致

损失率升高。

当副喷嘴风速一定时,随着主喷嘴风速的增加,损失率呈不断升高的趋势;其原因是副喷嘴风速一定时,果粒受到副喷嘴气流作用力一定,随着主喷嘴风速增大,果粒受到主/副喷嘴气流合作用力先减小后增大,同时水平方向的合位移增大,小的果串及部分果粒被吹出,从而除杂装置损失率升高。

4 除杂装置参数优化与试验验证

4.1 参数优化

由于除杂率和损失率在数值范围与量纲上存在差异,需尽可能减小其任一指标波动带来的除杂效果不稳定。采用正向化和逆向化的无量纲化处理方法对除杂率和损失率进行隶属值转换,进而消除除杂率和损失率之间不同量纲的影响。为获取理想的试验参数组合,以达到最佳的除杂效果,需要为除杂率和损失率附加权重^[18],依据生产需求,除杂率为核心诉求,设置除杂率权重为 0.7,损失率权重为 0.3,计算公式为:

$$H_1 = \frac{H_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (29)$$

$$H_2 = \frac{I_{\max} - H_i}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (30)$$

$$W = 0.7H_1 + 0.3H_2; \quad (31)$$

式(29)、式(30)、式(31)中, H_i 为指标值; H_1 为除杂率隶属值; H_2 为损失率隶属值; I 为指标最值; W 为综合分数。

为获得酿酒葡萄整穗收获机除杂装置最佳作业参数,以除杂率最高、损失率最低,即综合分数最高为目标,进行目标优化,其约束函数如下:

$$\begin{cases} \text{Max } W(a, b, c, d), \\ 14.5 \leq a \leq 17.5, \\ 12.5 \leq b \leq 15.5, \\ 120 \leq c \leq 150, \\ 5 \leq d \leq 10; \end{cases} \quad (32)$$

式(32)中 a, b, c, d 分别为试验因素 A, B, C, D 。

求解目标函数后进行取整,得到在主喷嘴风速 $16.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,副喷嘴风速 $13.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,喂入速度 $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,主喷嘴角度 8° 时,预测模型的除杂率为 90.99%,损失率为 0.67%。

4.2 试验验证

为了验证优化结果的可靠性,按照优化后的参数组合进行试验验证,重复 3 次试验取平均值。试验结果如表 5 所示。

表 5 理论优化与试验验证结果对比

项目	除杂率	损失率
理论优化值	90.99	0.67
试验值	89.35	0.71
相对误差	1.84	5.63

由表 5 可知:采用优化值试验后除杂率为 89.35%,损失率为 0.71%,与理论优化值的相对误差为 1.84%和 5.63%(相对误差为测量值的绝对误差与参考真值之比,用来评估误差相对于被测量值本身大小的显著程度)。除杂率的最佳作业参数试验值略小于优化值,可能的原因是气力式除杂部件由于装配误差导致其气密性较差,存在能耗损失。损失率的最佳作业参数试验值略大于优化值,可能的原因是提前在试验田进行混合物采集,之后进行除杂试验,期间混合物的含水率降低或运输过程中导致其理化性质变化,综合导致损失率的小幅度变动。整体来看,试验结果与理论优化值相差较小,说明了参数优化模型的可靠性。

5 结论

(1)针对酿酒葡萄整穗收获机收获过程中含杂率较高的问题,设计并优化除杂装置,对果叶分离过程进行分析,选择双喷嘴协同除杂的方式进行果叶分离,确定了影响除杂装置作业质量的因素为主、副喷嘴风速,喂入速度和主喷嘴角度。

(2)采用响应曲面试验设计方法对除杂装置进行四因素三水平试验,确定了各试验因素对除杂率的主次影响为主喷嘴风速>主喷嘴角度>喂入速度>副喷嘴风速,对损失率的主次影响为主喷嘴风速>副喷嘴风速>喂入速度>主喷嘴角度。

(3)对酿酒葡萄除杂装置进行除杂率最高、损失率最低参数优化及试验验证,确定试验因素最佳参数组合为主喷嘴风速 $16.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、副喷嘴风速 $13.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、喂入速度 $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、主喷嘴角度 8° ,除杂率达到 89.35%,损失率达到 0.71%,参数优化可靠。

参考文献 (References)

- [1] 关于加快推进葡萄酒产业发展的指导意见[J]. 新疆维吾尔自治区人民政府公报, 2022(Z1): 3-9.
- [2] 筱鹞. 新疆葡萄酒产量占全国 24.5% [J]. 酿酒科技, 2023(11): 129.
- XIAO L. The output of wine in Xinjiang accounts for 24.5% of the national total [J]. Brewing Technology,

- 2023(11): 129.
- [3] 蒲军, 黄晓鹏, 宗煜翔, 等. 小型林果采收机械研究现状[J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(6): 9-11.
- PU J, HUANG X P, ZONG Y X, et al. Research status of small-scale fruit and forest harvesting machinery[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2016, 44(6): 9-11.
- [4] 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 L T, WANG L H, KAN Z, et al. Research and test of 4PZ-1 self-propelled wine grape harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 38-44.
- [5] 张胜伟. 油莎豆联合收获机果杂分离清选系统关键部件设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [6] HU Y, TANG Z, WANG S, et al. The influence of the distribution law and uniformity of a threshed mixture with the working parameters of a soybean threshing device[J]. Agronomy, 2024, 14(7): 1581.
- [7] WANG W, LIU Z, RUSUL E, et al. Design and experiment of ground jujube picker based on bionic mechanism[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2025, 18(2).
- [8] MYHAN R, JACHIMCZYK E. Grain separation in a straw walker unit of a combine harvester: process model[J]. Biosystems Engineering, 2016, 145: 93-107.
- [9] PIEPER C, PFAFF F, MAIER G, et al. Numerical modelling of an optical belt sorter using a DEM-CFD approach coupled with particle tracking and comparison with experiments[J]. Powder Technology, 2018, 340: S0032591018307307.
- [10] CHEN Q. The positive and negative synergistic airflow-type jujube fruit harvester (P-N JH)[J]. Processes, 2022, 10.
- [11] REN D, YU H, ZHANG R, et al. Research and experiments of hazelnut harvesting machine based on CFD-DEM analysis[J]. Agriculture, 2022, 12, 2115.
- [12] 马秋成, 卢安舸, 高连兴, 等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 297-303.
- MA Q C, LU A G, GAO L X, et al. Test on aerodynamic characteristics of lotus seed materials and shell kernel separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 297-303.
- [13] 孙周盛, 武涛, 李宝林, 等. 基于CFD的切段式甘蔗收获机除杂室结构参数优化[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(8): 38-44.
- SUN Z S, WU T, LI B L, et al. Optimization of the structural parameters of the impurity removal chamber of the segmented sugarcane harvester based on CFD[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(8): 38-44.
- [14] 尹晓宇. 蓝靛果采收机收集清选装置设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2025.
- [15] 张冲. 酿酒葡萄收获机切割装置的设计与试验[D]. 石河子: 石河子大学, 2024.
- [16] 赵修晶. 气流扰动下黄瓜藤秸秆粉碎筛分过程数值模拟与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
- [17] 鞠衍清. 垂直下落球体运动的数值分析[J]. 大学物理, 2008(11): 11-13.
- JU Y Q. Numerical analysis of the motion of a vertically falling sphere[J]. College Physics, 2008(11): 11-13.
- [18] 姚权. 脉冲式气爆深松机设计与试验[D]. 石河子: 石河子大学, 2024.

(责任编辑:张忠)