

整秆式蔗种剥叶系统仿真与试验

沈中华 程虎强 董志康 李 涵

(桂林理工大学广西高校先进制造与自动化技术重点实验室, 桂林 541006)

摘要: 现有甘蔗剥叶机虽然能有效去除大部分蔗叶,但主要针对榨糖所需甘蔗,伤芽率较高,并不适用于蔗种剥叶。为解决甘蔗剥叶机伤芽率高的问题,设计了一种整秆式蔗种剥叶系统并对其进行了仿真与试验。首先利用虚拟仿真平台对剥叶过程进行单因素仿真试验,分析了碎叶机构、喂入排出机构以及剥叶机构对蔗种受力情况的影响。其次在仿真分析的基础上完成了试验台试验,根据仿真试验结果进行了二次回归通用旋转组合试验并优化了试验参数,得到最佳作业参数组合:柔性绳碎叶辊转速为 670 r/min、剥叶辊筒转速为 400 r/min、柔性绳碎叶元件单排根数为 16、柔性绳长度为 330 mm。在该参数组合下,蔗种剥叶含杂率为 6.59%,伤芽率为 4.70%。最后进行了 2 种剥叶机剥叶后蔗种的种植对比试验,结果表明,蔗种剥叶机和传统剥叶机剥叶后蔗种发芽率分别为 81.25% 和 56.25%。本文研究结果可为蔗种剥叶机设计提供借鉴和参考。

关键词: 蔗种; 剥叶系统; 蔗芽损伤; 虚拟仿真; 优化试验

中图分类号: S225.5⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0033-11

OSID:



Simulation and Experiment on Whole-stem Sugarcane Seed Stripping System

SHEN Zhonghua CHENG Huqiang DONG Zhikang LI Han

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology, Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Although existing sugarcane leaf strippers can effectively remove most sugarcane leaves, they mainly focus on the sugarcane for sugar extraction, without considering the damage to sugarcane bud, so they are unsuitable for sugarcane seed. To solve the problem of high bud damage rate in sugarcane leaf strippers, a whole-stem seed leaf stripping system was designed to conduct simulation analysis and experimental research. Firstly, a single-factor simulation experiment was performed on the whole-stem sugarcane seed stripping process by a virtual simulation platform to analyze the influences of the crushing mechanism, feeding and discharging mechanism, and stripping mechanism on the sugarcane seeds. Secondly, based on simulation analysis, a physical testing platform experiment was completed. According to the simulated experimental parameters, the quadratic regression universal rotation combination experiment was performed, and parameters were optimized. Finally, the optimal relevant operating parameters of the sugarcane seed stripping system were obtained: the flexible-rope-crushing-roller speed was 670 r/min, the stripping-roller speed was 400 r/min, the single row number of flexible rope crushing elements was 16, and the length of the flexible rope crushing elements was 330 mm, the trash content of sugarcane seed stripping was 6.59%, and the sprout damage rate was 4.70%. Finally, a comparative experiment was performed between the sugarcane seeds stripped by the optimal parameters and those stripped by traditional leaf stripping machines. The experimental results showed that the germination rate of sugarcane seeds planted under the whole-stem sugarcane seed stripping system was 81.25%, which was higher than the 56.25% germination rate of sugarcane seeds stripped by traditional leaf stripping machines. These can effectively improve the survival rate of sugarcane sprouts and have practical significance and application prospects for the development of sugarcane.

Key words: sugarcane seed; leaf stripping machine; bud damage; virtual simulation; optimization tests

收稿日期: 2024-09-25 修回日期: 2024-10-14

基金项目: 广西创新发展重大项目(桂科 AA22117006-1)和桂林理工大学博士科研启动基金项目

作者简介: 沈中华(1970—),男,高级工程师,博士,主要从事甘蔗收获机械研究, E-mail: shenzh2627369@aliyun.com

0 引言

甘蔗种植以蔗茎节上的蔗芽进行无性繁殖^[1-4],为保证蔗种发芽率和减少病虫害发生,新植蔗的蔗种均需先剥除蔗叶而不能损伤蔗芽^[5]。当前我国蔗种剥叶仍以人工为主,少量采用剥叶机作业^[6]。人工剥叶的蔗芽基本不会受到伤害,但效率较低;剥叶机剥叶效率高,但蔗芽损伤率高达16%;切段式甘蔗机收获效率高但伤芽率超过10%且蔗茎破损率高^[7-8]。SUKHBIR等^[9]在甘蔗种植作业中发现使用剥叶后的甘蔗作种,发芽率明显比未剥叶的种蔗高。BALWANT等^[10]试验表明,为保证甘蔗发芽率,蔗种上的蔗叶比例应不超过10%。罗亚伟等^[11]研究了不同种茎来源对甘蔗萌芽和幼苗生长的影响,试验表明剥叶后的甘蔗种茎发芽率要高于不剥叶的种茎发芽率,其主要原因是叶鞘的包裹不利于种茎透气,影响种茎的萌芽和发芽率。不完整蔗芽种植入土后难以萌芽,即使萌芽也不能生长为正常植株,致使蔗农后期还需进行补种。

综合现有剥叶机构研究现状可知,国内外学者已经对甘蔗剥叶机结构进行了大量研究^[12-22],通过试验台试验优化了剥叶元件结构和剥叶工艺参数,但相关研究大多考虑调整剥叶工艺参数和改进剥叶机结构来去除蔗叶,未考虑蔗芽的损伤问题。鉴于此,本文在课题组前期对蔗种的蔗叶与蔗芽力学性能试验分析的基础上,设计一种整秆式蔗种剥叶系统,利用虚拟仿真平台对剥叶过程进行单因素仿真试验,并搭建物理试验平台验证单因素仿真试验结果。根据得到的较优试验参数范围进行二次回归通用旋转组合试验并优化试验参数,最后将最优参数下剥叶后蔗种与传统剥叶机剥叶后蔗种进行种植对比试验,验证整秆式蔗种分段剥叶系统的可行性,以为蔗种剥叶机设计提供借鉴和参考。

1 蔗种剥叶过程蔗芽损伤机理

离心式剥叶法对蔗种剥叶时,高速旋转的剥叶元件反复打击、摩擦甘蔗,并将蔗叶和蔗茎扯拽分离。蔗梢含水率高,与蔗茎连接强度大且紧紧包裹在一起,为去除蔗梢,对剥叶元件的转速需求则更高。在此过程中,失去蔗叶保护的蔗芽就会受到剥叶元件的反复打击和摩擦。蔗种在喂入辊和输出辊的作用下不断向前运动,剥叶元件切入蔗芽的深度 h 逐渐增加,蔗芽受到剥叶元件的打击和摩擦作用,使得内部组织产生不同的损伤。随着剥叶滚筒转速的增加,剥叶元件对蔗芽的打击力、摩擦力以及打击频率也随之增加,从而导致蔗芽损伤率增加,如图1

所示(图中 ω_1 为剥叶辊筒旋转角速度,箭头表示剥叶辊筒旋转方向)。

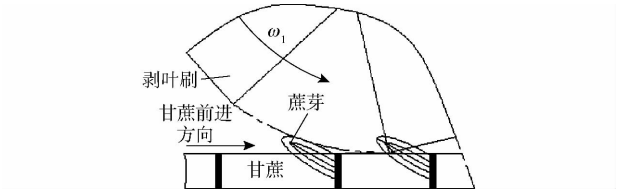


图1 甘蔗种芽损伤原理图
Fig. 1 Schematic of sugarcane bud damage

2 整秆式蔗种剥叶系统结构

文献[23-25]表明,剥叶辊筒转速越高,剥叶元件对甘蔗打击力则越大且作用次数越多,蔗叶能更有效地被剥除,但随着打击力增大以及接触次数增多,对蔗茎和蔗芽造成损伤的概率也会随之增加。因此,本研究利用旋转的柔性碎叶绳先对最难处理的蔗梢蔗叶进行碎叶,后续剥叶时则以较低转速将蔗叶剥离,系统结构如图2所示,上输送带一侧安装有挡板,可防止甘蔗在碎叶过程中产生轴向运动,各辊旋转方向和甘蔗运动方向如图中箭头方向所示。

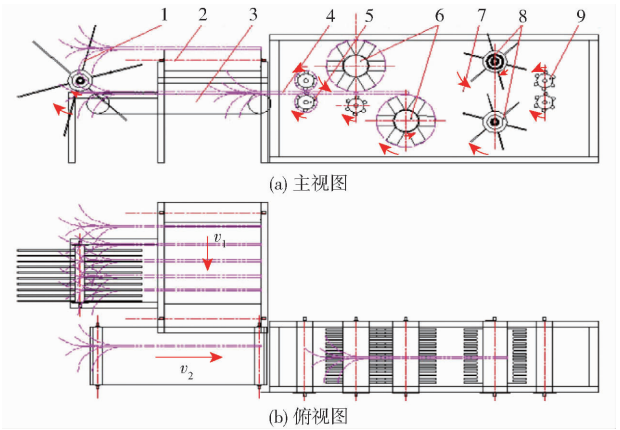


图2 整秆式蔗种剥叶系统结构图
Fig. 2 Structural diagram of whole-stem sugarcane seed stripping system

- 1. 碎叶元件 2. 上输送带 3. 下输送带 4. 甘蔗 5. 喂入辊
- 6. 剥叶辊 7. 机架 8. 耙叶辊 9. 排出辊

蔗种在上输送带输送过程中,由于叶片在自然状态下呈下垂状态,叶环至叶鞘处部分与茎秆之间会有间隙,旋转的柔性绳碎叶元件贴着茎秆划入间隙,可将叶鞘剥离或扩大叶鞘与茎秆的夹角,降低叶鞘与茎秆的连接强度。完成碎叶工序后,蔗种继续运动直到从上输送带掉入下输送带,蔗种改变运动方向为向前运动,蔗种根部进入剥叶机构。在喂入辊夹持作用下,蔗种被输送至剥叶机构,随辊筒旋转的剥叶元件接触到蔗种时,对蔗种产生摩擦打击作用,蔗叶被剥叶元件穿透撕裂,直至脱离茎秆。随后蔗种被输送至排出辊,排出辊梳齿状结构对蔗茎表

面进行梳刷,将残余蔗叶刮离蔗茎,起到清理除杂作用,直至整根蔗种被输送出排出辊,最终完成蔗种剥叶。

3 蔗种剥叶过程动力学仿真试验

蔗种剥叶过程仿真主要分为三维模型建立、模型柔性化处理、剥叶过程仿真 3 个步骤。剥叶系统以及甘蔗仿真模型在 Solidworks 软件中建立,然后通过 Hyberworks 软件中的 Hybermesh 模块对模型进行网格划分及材料属性定义等前处理操作,由 Optistruct 求解生成 MNF 文件,再导入 ADAMS 中进行动力学仿真,最终得到蔗种在剥叶过程中的受力情况。

3.1 仿真模型

将 Solidworks 中建立的模型导入到 ADAMS 前需进行简化处理,去除机架与传动机构等模型文件,将柔性化所用的简化辊筒刚体模型与蔗种刚体模型组成装配体,并将装配体保存为 x_t 格式输入到 ADAMS 中,利用 ADAMS 中柔性体代替刚体功能,选择保存的柔性体文件,以质心重合方式代替原有刚体模型,输入完成后柔性体仿真模型如图 3 所示。碎叶模型中 x 轴为蔗种运动方向, y 轴为蔗种前后移动方向, z 轴为蔗种上下跳动方向。

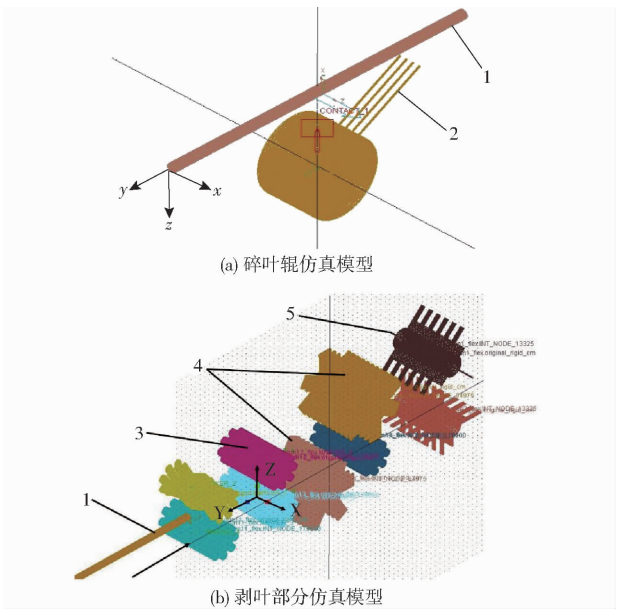


图 3 虚拟样机模型

Fig. 3 Virtual prototype model

1. 甘蔗 2. 碎叶元件 3. 喂入辊 4. 剥叶辊 5. 耙叶辊

3.2 仿真参数

3.2.1 运动参数与约束设定

整秆式蔗种剥叶系统整体模型分为碎叶部分、喂入部分、剥叶部分和输出部分。碎叶仿真时,碎叶辊添加绕 x 轴逆时针转动的转动副,转速参考文

献[26]暂定为 600 r/min。蔗茎添加沿 x 轴横向运动平移副,速度为 2 m/s。剥叶仿真时,喂入与排出辊和剥叶辊以上述相同方式添加约束与驱动,喂入与排出辊转动速度设定为 200 r/min,剥叶辊转速暂定为 500 r/min,蔗种输送初速度设定为 1.5 m/s。为还原真实蔗种传输过程,在蔗种茎秆尾端设定一个沿运动方向的单向力,用 IF 函数表示力变化,设定为 IF(time - 0.1 : -10, 0, 0),表示时间前 0.1 s 内受到 10 N 的单向力,当单向力消失后,蔗种在系统中的前进速度取决于与各元件之间的相互作用。

3.2.2 碰撞参数与接触参数定义

仿真试验开始前需设定碰撞参数与接触参数,碰撞参数包括刚度 k 、碰撞指数 e 、阻尼系数 c 和穿透深度 d ,刚度 k 由 Hertz 弹性碰撞模型进行计算,即

$$k = \frac{4 \sqrt{RE^*}}{3} \tag{1}$$

其中

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$$

式中 R_1, R_2 ——两碰撞物体在碰撞点半径
 μ_1, μ_2 ——两物体泊松比
 E_1, E_2 ——两物体弹性模量

将蔗种半径(15 mm)与所设计机构尺寸代入式(1)计算,碎叶元件截面为 5 mm × 5 mm 的方形,可简化为直径为 6 mm 的圆形。对于剥叶元件与输出元件,相当于半径无穷大的平面与圆柱体碰撞。参考文献[27 - 28]中普通橡胶、尼龙与蔗种之间的接触参数,设置接触参数如表 1 所示。

表 1 接触参数
Tab. 1 Contact parameters

参数	蔗种与喂入辊	蔗种与碎叶辊	蔗种与其他橡胶元件
刚度 $k/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	146. 50	5. 27	36. 45
碰撞指数 e	2. 20	2. 00	2. 20
阻尼系数 $c/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$	0. 35	0. 70	0. 35
穿透深度 d/mm	0. 10	0. 10	0. 10
静摩擦因数	0. 70	0. 55	0. 70
动摩擦因数	0. 55	0. 35	0. 55
静平移速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0. 10	0. 10	0. 10
摩擦平移速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	1. 00	1. 00	1. 00

3.3 仿真结果

设定碎叶部分仿真时间为 0.05 s、仿真步长为 2 000,剥叶部分仿真时间为 1 s、仿真步长为 1 500。碎叶过程仿真见图 4,碎叶过程蔗种受力变化曲线见图 5。

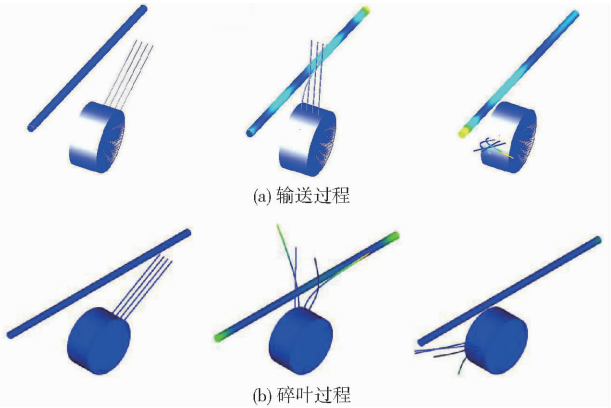


图 4 碎叶仿真过程

Fig. 4 Simulation process of broken leaves

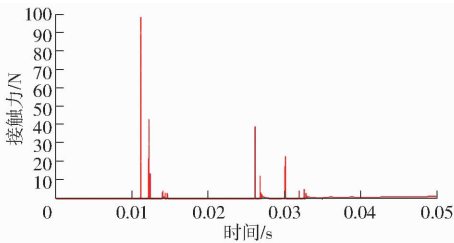


图 5 碎叶过程蔗种受力变化曲线

Fig. 5 Force on sugarcane seeds during leaf crushing process

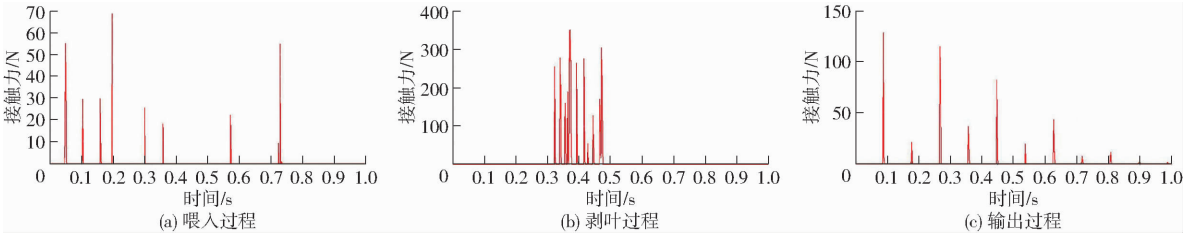


图 6 剥叶部分蔗种受力变化曲线

Fig. 6 Simulation results of leaf stripping section

分析图 6 可知,剥叶元件对蔗种的作用力最大,是造成蔗芽损伤的主要原因之一。在仿真试验时,将所有柔性体模型输入到 ADAMS 中会使柔性化计算量增大,整个剥叶系统柔性体仿真时,会出现仿真效率低甚至软件崩溃。

为减少仿真计算量,提高计算速度,本文后续试验剥叶模型只将剥叶辊替换为柔性体,其余机构设置为刚体,采用分段蔗种模型,每个蔗种节段之间通过 Busing 柔性连接,参考文献[30-31]对力与力矩进行设置,每段蔗种节段与元件之间的碰撞参数和接触参数同之前的参数设置,得到剥叶仿真模型如图 7 所示。

3.4 剥叶过程仿真试验

3.4.1 仿真试验方案

文献[32-33]表明,剥叶辊转速是影响甘蔗损伤的重要因素,尼龙柔性绳碎叶辊是剥叶系统中的重要组成部分,其柔性绳长度、根数及辊筒转速等均会影响碎叶效果。因此,本文选择相关设计参数作

蔗种碎叶过程可分为蔗种沿碎叶辊筒轴向方向输送到碎叶机构的输送过程(图 4a)与后排碎叶元件对蔗种产生打击作用的碎叶过程(图 4b)。

由图 5 可知,前 0.02 s 柔性绳元件接触蔗种产生打击作用并逐渐发生变形,最大接触力为 98.35 N,随后碎叶元件弹开并将蔗种卡在元件间隙之间,产生 42.87 N 的接触力,能够作用于散开的蔗叶上,达到碎叶目的。

剥叶部分仿真结果如图 6 所示。蔗种以一定的速度通过喂入辊,喂入元件将蔗种夹持向后输送,并产生接触作用,最大作用力为 68.82 N。由已有研究^[29]可知,剥叶辊转速是影响含杂率的重要因素,且要大于喂入排出辊的转速,因此对蔗种产生的作用力也要大于其它机构。从图 6 可以看出,蔗种接触到剥叶元件时作用力的打击频率明显增加,最大作用力为 353.35 N。排出辊的转速与喂入辊筒相同,但受元件外形影响,输出元件接触到蔗种后会产生较大变形,作用力最大为 129.05 N。由于蔗种基部直径大于尾部,输出元件作用面积减小,作用力也开始减小,直至蔗种离开排出辊完成整个剥叶工序。

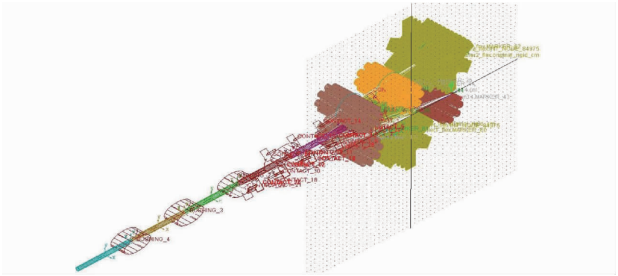


图 7 简化后剥叶仿真模型

Fig. 7 Simplified leaf stripping simulation model

为试验因素,采用单因素仿真试验,各因素取 5 水平,取茎秆所受最大接触力为考察指标,试验方案见表 2,其中碎叶辊筒的有效长度为 300 mm。

3.4.2 仿真试验结果

仿真试验结果如图 8 所示。当剥叶辊转速为 500 r/min,柔性绳长度为 280 mm、单排根数为 12 根时,蔗种与碎叶元件之间的最大接触力随着柔性绳碎叶辊筒的转速增大而增加,在试验水平上依次为 72.8、94.02、137.22、163.73、213.90 N(图 8a)。仿

表 2 单因素仿真试验方案

Tab.2 Single factor experimental plan

水平	因素			
	柔性绳碎叶辊转速/ 速/(r·min ⁻¹)	剥叶辊转速/ (r·min ⁻¹)	柔性绳长 度/mm	柔性绳单排 根数/根
1	500	300	160	6
2	600	400	220	9
3	700	500	280	12
4	800	600	340	15
5	900	700	400	18

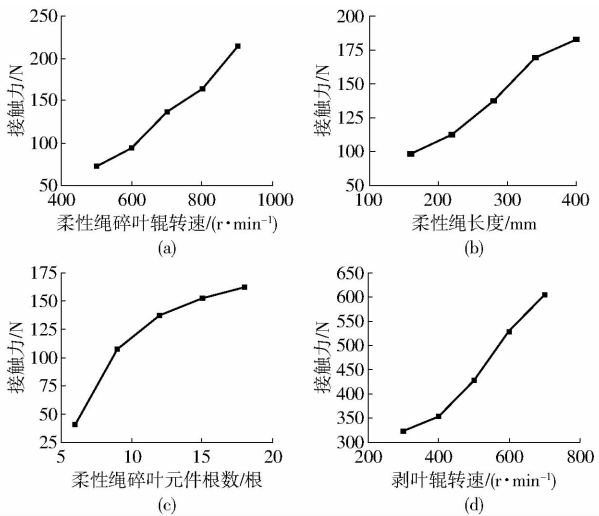


图 8 仿真试验结果

Fig. 8 Simulation test results

真结果表明柔性绳碎叶辊筒转速增加导致碎叶元件接触到蔗种时的打击力与摩擦力增大,对蔗种的冲击作用增强。

当柔性绳碎叶辊转速为 700 r/min,碎叶元件单排根数为 12 根、剥叶辊转速为 500 r/min 时,蔗种所受最大接触力随柔性绳长度的增加而增大,在试验水平上依次为 98.35、112.47、137.22、169.26、182.68 N(图 8b)。从仿真结果可看出,柔性绳过长或过短对接触力的变化值影响不大,而在 220 mm 与 340 mm 之间变化明显,这是由于柔性绳过短时,蔗种与其之间的接触作用时间减小,接触作用变化不明显;柔性绳过长时,由于冲击作用较大,碎叶元件形变变大,接触蔗种后被立即弹开,与蔗种之间接触作用减小。

当柔性绳碎叶辊转速为 700 r/min,剥叶辊转速为 500 r/min,柔性绳长度为 280 mm 时,随着碎叶元件单排根数的增加,蔗种所受最大接触力逐渐增加,在试验水平上依次为 40.89、107.25、137.22、152.51、161.78 N(图 8c)。从结果可以看出,碎叶元件由 6 根增加至 9 根时数值相差较大。通过观察仿真过程得知,由于单排 6 根的碎叶元件之间间隔大于蔗种直径,导致碎叶元件从蔗种侧面刮擦而过,

未产生打击作用,随着碎叶元件根数增多,元件之间的间隔小于蔗种直径,碎叶元件与蔗种充分接触,对蔗种形成夹持作用,接触力逐渐增大。

当剥叶辊筒其他参数不变,只改变剥叶辊筒转速时,剥叶元件与蔗种之间的接触力随剥叶辊筒转速的增加而增大,最大可达到 604.99 N(图 8d)。出现该现象的原因与柔性绳碎叶辊相同,但剥叶元件的形状和材料与碎叶元件不同,因此产生的接触力要远大于碎叶元件。

仿真试验结果表明,当碎叶元件单排根数、柔性绳长度、碎叶辊转速和剥叶辊转速在一定范围内时,能有效影响蔗种剥叶效果,但可能与现实情况存在一定差异,需进一步通过物理试验验证剥叶效果。

4 蔗种剥叶过程物理样机试验

4.1 试验材料及设备

4.1.1 试验材料

试验于 2022 年 12 月在桂林理工大学机械与控制工程学院农机化实验室进行,选用桂林市农业科学研究中心收获的桂糖 42 号蔗种为试验材料,蔗种生长状况良好,蔗芽均无明显损伤,甘蔗长度 2 920 ~ 3 370 mm,直径 38 ~ 59 mm,蔗梢含水率约为 62.54%,单根甘蔗蔗芽个数为 16 ~ 25。为降低蔗叶与蔗芽在收获后受水分散失等因素影响剥叶效果,所有试验在甘蔗收获后 3 d 内完成。

4.1.2 试验设备

试验设备包括:Y90L-4 型(2.2 kW)和 Y80L-4 型(1.5 kW)三相异步电机、变频器、激光式转速仪(测量范围:2.5 ~ 99 999 r/min,测量精度:±0.05%)、电子天平(测量精度:1 g)、数码相机、卷尺等。

由于受试验条件的限制,本试验由碎叶试验和剥叶试验两部分组成。试验时由人工沿碎叶辊筒轴向方向均匀移动甘蔗模拟碎叶过程,然后将碎叶后的甘蔗由根部喂入甘蔗剥叶机。碎叶试验平台如图 9 所示,碎叶辊筒有效长度为 300 mm。蔗种剥叶试验台由原有甘蔗剥叶机改制而成,如图 10 所示。

4.2 试验方案及指标

4.2.1 试验方案

根据仿真试验结果设计单因素物理预试验,通过分析各因素对试验结果的影响趋势及原因,选取较优试验因素取值范围,以便后续优化参数。试验中各辊筒转速由变频器频率进行调节,喂入辊筒与排出辊筒转速固定为 200 r/min,蔗种输送速度为 2 m/s,每组合重复 5 次试验。将碎叶后的蔗种由人

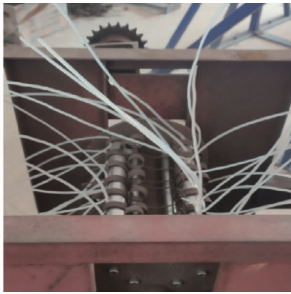


图9 碎叶试验台

Fig.9 Platform for broken leaves system



图10 蔗种剥叶系统物理试验台

Fig.10 Platform for sugarcane seed stripping system

1.变频器 2.三相异步电机 3.喂入辊 4.剥叶辊 5.排出上辊 6.排出下辊

工单根喂入剥叶系统,最终统计的结果取平均值。

4.2.2 试验指标

在 NY/T 1770—2009《甘蔗剥叶机质量评价技术规范》提及的主要性能指标中,剥叶后的甘蔗含杂率应不大于 3%,该指标主要针对的是糖厂对糖蔗的收获要求。蔗种剥叶时,无需考虑蔗种生长点以上蔗叶的影响,因此本试验对含杂率的要求在参考甘蔗剥叶机质量评价技术规范的要求上适当放宽。对应仿真试验结果选取柔性绳碎叶辊转速 x_1 、剥叶辊转速 x_2 、柔性绳单排根数 x_3 与柔性绳长度 x_4 作为因素。将含杂率 J_h 与伤芽率 S_y 作为试验评价指标,伤芽率与含杂率越低,剥叶后蔗种质量越高。其计算式为

$$J_h = \frac{m_1}{m} \times 100\% \tag{2}$$

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

式中 m_1 ——剥叶后残留在蔗茎上的杂质质量,kg
 m ——剥叶后甘蔗和残留蔗叶等杂质总质量,kg
 n_1 ——剥叶后破损的种芽数量,个
 n ——蔗种茎秆上所有种芽个数,个

收集数据时,先测量记录剥叶后的蔗种质量,再手工剥掉残余在茎秆的蔗叶并测量记录其质量,蔗芽是否损伤由人工判断与计数。

4.3 试验结果及分析

各试验因素对伤芽率和含杂率的影响如图 11

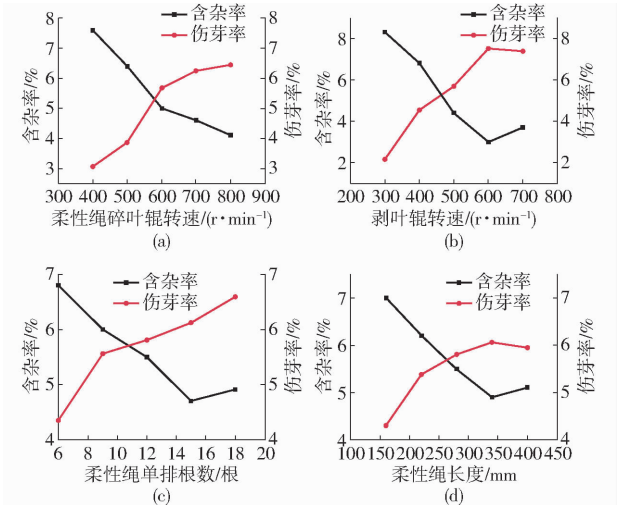


图11 单因素物理试验结果

Fig.11 Single factor physical test results

所示。柔性绳碎叶辊转速对蔗种含杂率与伤芽率的影响结果如图 11a 所示。随着柔性绳碎叶辊转速增加,蔗种含杂率呈减小趋势,伤芽率呈增大趋势。柔性绳碎叶辊转速 400 ~ 600 r/min 时,碎叶元件无法完全击碎蔗叶,导致蔗种剥叶后含杂率较高,随着转速继续升高,碎叶作用效果显著,蔗种剥叶后含杂率与伤芽率变化趋势明显。当转速 700 ~ 800 r/min 时,大部分蔗叶被碎叶辊击碎脱离蔗种,但部分叶鞘仍紧贴在茎秆上导致较难剥除,需要靠后续剥叶辊进行剥离,但该组试验剥叶辊转速固定为 500 r/min,因此变化趋势较缓。从试验结果可知,当柔性绳碎叶辊转速为 400 r/min 时,蔗种伤芽率低,但含杂率较高,后续优化试验中选择柔性绳碎叶辊转速为 500 ~ 800 r/min。

剥叶辊转速对蔗种含杂率与伤芽率的影响如图 11b 所示。随着剥叶辊筒转速增大,蔗种含杂率先降低后逐渐增大,伤芽率先增大后降低,在 300 ~ 600 r/min 范围内,剥叶辊筒转速提高增大了剥叶元件对蔗种的冲击作用,同时增加了对蔗种的梳刷频率,蔗叶剥除干净,但蔗芽受到损伤的概率随之增加。当剥叶辊转速为 600 ~ 700 r/min 时,剥叶元件夹持输送甘蔗速度随转速的升高而加快,导致剥叶元件对蔗种的梳刷频率降低,蔗种含杂率上升,伤芽率下降,但由于剥叶辊转速过大,剥叶元件会对蔗节造成损伤,同时蔗芽也几乎破裂。综合上述分析结果,选择剥叶辊转速为 300 ~ 600 r/min。

尼龙柔性绳单排根数对蔗种伤芽率的影响如图 11c 所示。随着柔性绳单排根数增多,蔗种含杂率先减小后增大,伤芽率逐渐增大。柔性绳单排根数增多,柔性绳之间的距离减小,对蔗种的作用范围和次数增加,对于张开披散的蔗叶作用效果明显,但导致蔗芽受损的几率增大。当柔性绳单排根数增加至 18

根时,柔性绳间的间隔要远小于蔗种茎秆直径,导致蔗种横向通过柔性绳碎叶辊变得困难,碎叶效果下降,含杂率上升。综合考虑含杂率与伤芽率的数据结果,选择后续试验的柔性绳单排根数为9~18根。

尼龙柔性绳长度对蔗种含杂率与伤芽率的影响如图 11d 所示,随着柔性绳长度增大,剥叶后蔗种含杂率先呈减小后增大的趋势,伤芽率先增大后逐渐降低。当柔性绳长度增加至 340 mm 后,柔性绳在旋转过程中受惯性作用而弯曲明显,与蔗种之间的作用位置更靠近柔性绳中部,导致切向力作用减小,对蔗叶的作用力减小,蔗种含杂率因而增大,伤芽率降低。由试验结果可知,柔性绳长度为 160 mm 时伤芽率虽然较低,但剥叶后残余蔗叶相比于其他分组较多,导致含杂率较高,因此后续参数优化试验舍弃该水平。

5 剥叶参数优化试验

5.1 试验方案及结果

确定各试验因素参数范围后,利用 Design-Expert 软件设计二次回归通用旋转组合试验,建立试验因素与试验指标之间的回归模型,进一步优化参数,获取最优参数组合进行验证试验,试验因素编码见表 3。试验结果见表 4,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Encoding of experimental factors

编码	因素			
	柔性绳碎叶	剥叶辊转	柔性绳单	柔性绳
	辊转速 x_1 /	速 x_2 /	排根数	长度 x_4 /
	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	x_3 /根	mm
2	800	600	18	400
1	725	525	16	355
0	650	450	14	310
-1	575	375	12	265
-2	500	300	9	220

5.2 试验结果分析

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行分析与拟合,得到蔗种含杂率方差分析结果见表 5,伤芽率方差分析结果见表 6。

分析表 5 可知,一次项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 与交互项 X_1X_2 及二次项 X_1^2 对蔗种含杂率的影响极显著 ($P < 0.01$),二次项 X_2^2 较为显著 ($P < 0.05$),影响显著性由大到小为 X_2 、 X_1 、 X_1^2 、 X_4 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_2^2 ,其余项不显著。回归模型组间差异显著性检验 $P < 0.0001$,失拟项 $P = 0.1631$,决定系数 $R^2 = 0.9389$,回归模型显著,失拟项不显著,决定系数接近于 1,回归模型

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experimental plan and results

序号	因素				含杂率	伤芽率
	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	1	1	1	1	3.91	7.61
2	1	1	1	-1	4.53	6.19
3	1	1	-1	1	4.30	6.52
4	1	1	-1	-1	5.73	5.05
5	1	-1	1	1	6.75	5.21
6	1	-1	1	-1	8.50	4.49
7	1	-1	-1	1	7.82	4.95
8	1	-1	-1	-1	8.03	4.21
9	-1	1	1	1	6.23	5.16
10	-1	1	1	-1	7.43	3.33
11	-1	1	-1	1	7.89	4.08
12	-1	1	-1	-1	8.26	2.88
13	-1	-1	1	1	8.85	4.21
14	-1	-1	1	-1	9.53	3.53
15	-1	-1	-1	1	9.04	3.37
16	-1	-1	-1	-1	9.15	2.24
17	2	0	0	0	6.07	6.38
18	-2	0	0	0	9.08	4.17
19	0	2	0	0	5.05	6.12
20	0	-2	0	0	9.16	4.30
21	0	0	2	0	5.11	4.44
22	0	0	-2	0	6.83	3.33
23	0	0	0	2	5.56	4.17
24	0	0	0	-2	6.93	3.41
25	0	0	0	0	6.42	4.21
26	0	0	0	0	6.85	4.85
27	0	0	0	0	6.13	4.40
28	0	0	0	0	6.04	4.95
29	0	0	0	0	5.82	4.82
30	0	0	0	0	6.56	4.65
31	0	0	0	0	6.69	4.26

拟合精度较高。回归模型的变异系数为 7.65%,表明试验数据可靠,精确度为 17.7688,表明模型能较好地预测含杂率。剔除不显著项因素后,得到含杂率与各试验因素之间的回归模型为

$$Y_1 = 6.33 - 0.9946X_1 - 1.11X_2 - 0.3796X_3 - 0.3184X_4 - 0.3669X_1X_2 + 0.4014X_1^2 + 0.2839X_2^2$$

(4)

由表 6 可知,一次项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ,交互项 X_1X_2 与二次项 X_1^2 对蔗种伤芽率的影响显著 ($P < 0.01$),二次项 X_2^2 较为显著,影响显著性由大到小为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1^2 、 X_4 、 X_2^2 ,其余项不显著。回归模型组间差异显著性检验 $P < 0.0001$,失拟项 $P = 0.1796$,决定系数 $R^2 = 0.9334$,回归模型显著,失拟项不显著,决定系数接近于 1,表明回归模型拟合精度较高。回归模型变异系数为 8.35%,试验数据较为可靠,模

表 5 蔗种含杂率 J_h 方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of trash content J_h in sugarcane seeds

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	69.15	14	4.94	19.64	<0.000 1
X_1	21.72	1	21.72	86.33	<0.000 1
X_2	31.76	1	31.76	126.27	<0.000 1
X_3	2.62	1	2.62	10.42	0.005 3
X_4	3.46	1	3.46	13.75	0.001 9
X_1X_2	2.15	1	2.15	8.56	0.009 9
X_1X_3	0.000 8	1	0.000 8	0.003	0.957 0
X_1X_4	0.170 2	1	0.170 2	0.6764	0.422 9
X_2X_3	0.841 8	1	0.841 8	3.35	0.086 1
X_2X_4	0.047 3	1	0.047 3	0.188 1	0.670 3
X_3X_4	0.283 6	1	0.283 6	1.13	0.304 1
X_1^2	4.38	1	4.38	17.40	0.000 7
X_2^2	2.14	1	2.14	8.52	0.010 0
X_3^2	0.002 8	1	0.002 8	0.011 3	0.916 8
X_4^2	0.098 9	1	0.098 9	0.393	0.539 6
残差	4.02	16	0.251 6		
失拟	3.19	10	0.318 5	2.28	0.163 1
纯误差	0.839 5	6	0.139 9		
总和	73.18	30			

表 6 蔗种伤芽率 S_y 方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of sugarcane seed damage rate S_y

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	34.99	14	2.50	16.03	<0.000 1
X_1	14.85	1	14.85	95.22	<0.000 1
X_2	9.96	1	9.96	63.85	<0.000 1
X_3	2.60	1	2.60	16.67	0.000 9
X_4	1.33	1	1.33	8.56	0.009 9
X_1X_2	1.74	1	1.74	11.17	0.004 1
X_1X_3	0.000 6	1	0.000 6	0.004 0	0.950 3
X_1X_4	0.014 4	1	0.014 4	0.092 3	0.765 2
X_2X_3	0.297 0	1	0.297 0	1.90	0.186 6
X_2X_4	0.019 6	1	0.019 6	0.125 7	0.727 6
X_3X_4	0.046 2	1	0.046 2	0.296 4	0.593 7
X_1^2	1.48	1	1.48	9.49	0.007 2
X_2^2	1.28	1	1.28	8.19	0.011 3
X_3^2	0.411 4	1	0.411 4	2.64	0.123 9
X_4^2	0.590 4	1	0.590 4	3.79	0.069 5
残差	2.50	16	0.156 0		
失拟	1.95	10	0.195 2	2.16	0.179 6
纯误差	0.543 1	6	0.090 5		
总和	37.49	30			

型精确度为 14.530 1,能够较好地预测蔗种伤芽率。剔除不显著项因素后,得到伤芽率与各因素回归模型为

$$Y_2=4.59+0.786\ 7X_1+0.644\ 2X_2+0.329\ 2X_3+0.235\ 8X_4+0.33X_1X_2+0.227\ 6X_1^2+0.211\ 3X_2^2$$

(5)

利用 Design-Expert 软件对数据进行处理,柔性绳碎叶辊转速与剥叶辊转速的交互作用对含杂率和伤芽率 2 个试验指标的影响较为显著,响应曲面见图 12。

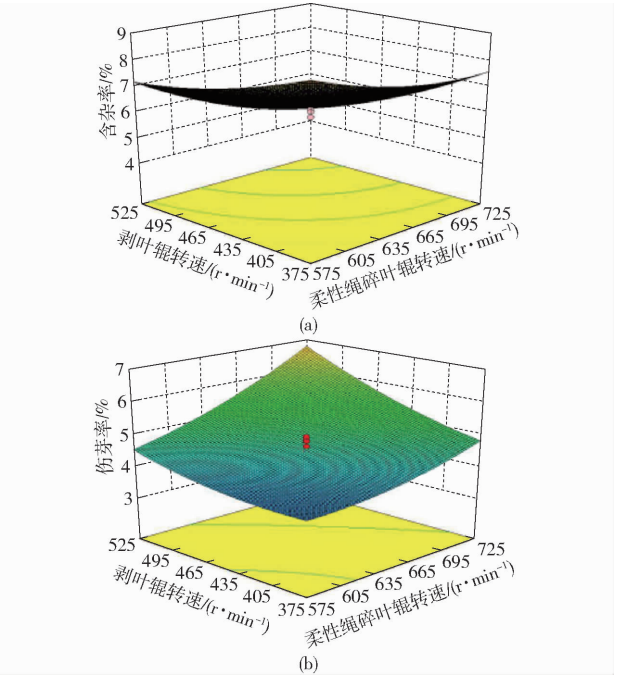


图 12 含杂率与伤芽率的双因素影响响应曲面

Fig. 12 Response surfaces affected by two factors (trash content and sprout damage rate)

当柔性绳碎叶辊转速一定时,蔗种含杂率随着剥叶辊转速的增加而逐渐减小,且剥叶辊转速越大,蔗种含杂率减小趋势变缓;当剥叶辊转速一定时,蔗种含杂率与柔性绳碎叶辊转速成正比(图 12a)。当柔性绳碎叶辊转速一定时,随着剥叶辊转速增加,蔗种伤芽率逐渐升高;当剥叶辊转速一定时,蔗种伤芽率与柔性绳碎叶辊成正比(图 12b)。上述试验结果与单因素试验结果基本一致。

5.3 参数优化及验证

运用 Design-Expert 软件中的优化功能进行参数组合多目标优化,根据蔗种剥叶系统工作时的实际工作条件、相关性能要求及模型分析结果,建立蔗种含杂率与伤芽率优化目标函数及约束条件

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ -2 \leq X_1 \leq 2 \\ -2 \leq X_2 \leq 2 \\ -2 \leq X_3 \leq 2 \\ -2 \leq X_4 \leq 2 \end{cases}$$

(6)

通过优化求解确定较优参数组合:柔性绳碎叶辊转速为 670.67 r/min,剥叶辊转速为 402.36 r/min,柔性绳单排根数为 15.96,柔性绳长度为 334.3 mm,该

组合下蔗种含杂率与伤芽率为 6.59%、4.70%。为验证优化效果,对优化后的参数组合进行物理试验验证,设定柔性绳碎叶辊转速为 670 r/min,剥叶辊筒转速为 400 r/min,柔性绳单排根数为 16,柔性绳碎叶元件长度为 330 mm。

为进一步研究剥叶装置的实际工作效果,验证试验以 1 根、3 根、5 根喂入剥叶系统,并重复 5 次取平均值,试验结果如表 7 所示,剥叶后部分蔗种见图 13。

表 7 验证试验结果
Tab.7 Validation test results %

根数	含杂率 J_h	伤芽率 S_y
1	6.22	4.46
3	7.01	4.33
5	8.03	3.84



图 13 剥叶后蔗种

Fig. 13 Cane seed after stripped

结果表明,1 根蔗种输入情况下,蔗种含杂率为 6.22%,伤芽率为 4.46%,试验验证结果与优化理论值之间的相对误差分别为 5.62%、5.11%,验证了模型具有一定的可靠性,相关优化参数合理。多根甘蔗喂入时,由于甘蔗之间相互重叠,导致含杂率上升而伤芽率下降。

从图 13 可以看出,在优化参数下蔗种含杂率仍较高的主要原因是部分蔗种蔗梢的蔗叶仍有残留,主要原因是本装置未设置断尾轮,后续可统一在蔗种生长点将梢部切除,含杂率会进一步降低。

6 种植试验

为进一步验证最佳参数下蔗种实际剥叶效果,通过种植试验比较整秆式蔗种剥叶系统与传统甘蔗剥叶机在伤芽率之间的差异。随机选取传统甘蔗剥叶机剥叶后的蔗种和整秆式蔗种剥叶系统最佳参数下剥叶后的蔗种,以发芽率为试验指标,将蔗种按节切断成带蔗芽的小段,两个对比试验组各取 16 个蔗芽段。将摆放整齐后的蔗种表面覆盖一层薄土,做好识别标签并定期浇水施肥,种植试验如图 14 所示。

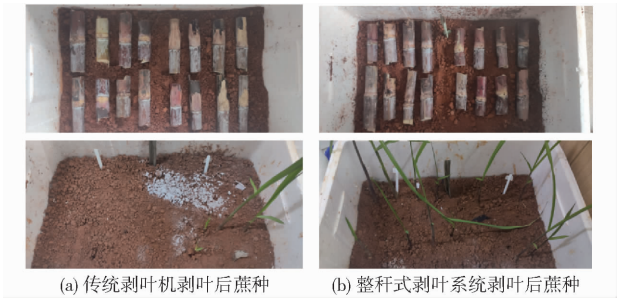


图 14 种植对比试验结果

Fig. 14 Results of planting comparison experiment

传统剥叶机剥叶后蔗种发芽率为 56.25%,破碎蔗芽出现腐烂发霉的情况,且相较于同一时间种植的整秆式蔗种剥叶系统剥叶后的蔗种,生长出的甘蔗矮小。整秆式剥叶系统剥叶后蔗种发芽率为 81.25%,甘蔗长势良好,未萌发的蔗芽可能受到了损伤,也出现了腐烂发霉,土壤表面出现了白色霉菌。种植试验结果表明整秆式蔗种剥叶系统相较于传统甘蔗剥叶机能够降低蔗种剥叶的伤芽率,剥叶后能够发育成完整植株,适用于蔗种甘蔗剥叶。

7 结论

(1)设计了一种整秆式蔗种剥叶系统,针对该系统建立了蔗种剥叶过程仿真模型并进行仿真试验分析。仿真试验表明:蔗种剥叶过程中所受最大接触力峰值随柔性绳碎叶辊转速与剥叶辊转速的增大而增大;柔性绳长度影响与蔗种接触的作用时间和冲击强度,柔性绳越长蔗种所受接触力越大;柔性绳碎叶元件单排根数增加,元件之间距离减小,与蔗种蔗芽的接触面积增大,接触力随之增大。

(2)搭建了蔗种剥叶试验平台,设计了各试验因素与试验指标间的回归模型,并对回归模型进行优化求解,得出蔗种剥叶系统最佳相关作业参数为:柔性绳碎叶辊转速 670 r/min、剥叶辊筒转速为 400 r/min、柔性绳碎叶元件单排根数 16 根、柔性绳长度 330 mm,此时蔗种剥叶后含杂率为 6.59%,伤芽率为 4.70%。试验验证结果与优化理论值之间的相对误差分别为 5.62%、5.11%,蔗种剥叶效果较好。

(3)完成了传统甘蔗剥叶机和整秆式蔗种剥叶系统剥叶后的蔗种植对比试验。试验结果表明:整秆式蔗种剥叶机系统能有效提高蔗芽的存活率,蔗种植发芽率为 81.25%,远高于传统剥叶机剥叶后蔗种 56.25% 的发芽率,证明了最佳参数下整秆式蔗种剥叶系统的有效性。

参 考 文 献

[1] 谢卢鑫,王俊,程绍明,等. 整秆式甘蔗收割机剥叶过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 56–65.
XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Simulation analysis and experiments of leaf stripping process for whole-stalk

- sugarcane harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 56–65. (in Chinese)
- [2] 韩杰, 文晟, 刘庆庭, 等. 预切种式甘蔗种植机的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 109–118.
HAN Jie, WEN Sheng, LIU Qingting, et al. Design and test of pre-seed-cutting sugarcane planter[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 109–118. (in Chinese)
- [3] 李尚平, 黄宗晓, 张伟, 等. 预切种式宽窄行甘蔗种植机单辊排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 113–121.
LI Shangping, HUANG Zongxiao, ZHANG Wei, et al. Experiments and design on single-rolled seed-sowing system of pre-seed-cutting sugarcane planters with wide and narrow row spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 113–121. (in Chinese)
- [4] 樊秋菊, 黄清玲, 吴合槟, 等. 国内外甘蔗收获机械化发展概况与前景[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(6): 1–11.
FAN Qiuju, HUANG Qingling, WU Hebin, et al. Prospect and development of sugarcane mechanized harvest at home and abroad[J]. Sugarcane and Canesugar, 2020, 49(6): 1–11. (in Chinese)
- [5] 刘庆庭, 莫建霖, 李廷化, 等. 我国甘蔗种植机技术现状及存在的关键技术问题[J]. 甘蔗糖业, 2011, 40(5): 52–58.
LIU Qingting, MO Jianlin, LI Tinghua, et al. Current situation of sugarcane planter and its key technical issues in China[J]. Sugarcane and Canesugar, 2011, 40(5): 52–58. (in Chinese)
- [6] 董志康. 整秆式蔗种剥叶机设计及试验研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
DONG Zhikang. Design and experimental study of leaf stripping machine for whole stalk-type sugarcane seed[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [7] 牟向伟, 区颖刚, 吴昊, 等. 甘蔗叶鞘在弹性剥叶元件作用下破坏高速摄影分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 85–89.
MOU Xiangwei, OU Yinggang, WU Hao, et al. Damage of sugarcane leaf sheath under action of elastic leaf-stripping elements based on high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 85–89. (in Chinese)
- [8] 牟向伟, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 弹性齿滚筒式甘蔗剥叶装置[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 60–65.
MOU Xiangwei, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Elastic dentation roller type sugarcane leaf-stripping device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 60–65. (in Chinese)
- [9] SUKHBIR S, SINGH P R, SINGH A K, et al. Present status and future need of mechanizing sugarcane cultivation in India[J]. Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America (AMA), 2016, 47(1): 75–81.
- [10] BALWANT K, SEED S. Single bud plantlets and tissue culture techniques for seed multiplication in sugarcane and seed standard[J]. Medicon Agriculture & Environmental Sciences, 2022, 3(2): 3–12.
- [11] 罗亚伟, 覃振强, 梁阔, 等. 不同种茎处理对甘蔗萌芽和幼苗生长的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(3): 455–459.
LUO Yawei, QIN Zhenqiang, LIANG Tian, et al. Effects of different seed stems on germination and emergence of sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(3): 455–459. (in Chinese)
- [12] SRIVASTAVA A K, HERUM F L, STEVENS K K. Impact parameters related to physical damage to corn kernel[J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(6): 1147–1151.
- [13] SINGH A K, SOLOMON S. Development of a sugarcane detrasher[J]. Sugar Tech: An International Journal of Sugar Crops and Related Industries, 2015, 17(2): 189–194.
- [14] ASHFAQ S. Performance evaluation of sugarcane stripper for trash recovery[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2014, 52(2): 491–496.
- [15] BASTIAN J, SHRIDAR B. Investigations on sugarcane de-trashing mechanisms[J]. International Journal of Engineering Research, 2014, 3(7): 453–457.
- [16] MENG Yanmei, CHEN Yuanling, LI Shangping, et al. Research on the orthogonal experiment of numeric simulation of macromolecule-cleaning element for sugarcane harvester[J]. Materials & Design, 2009, 30(6): 2250–2258.
- [17] 廖平伟, 张华, 罗俊, 等. 我国甘蔗机械化收获现状的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 26–29.
LIAO Pingwei, ZHANG Hua, LUO Jun, et al. Study on the status of sugarcane harvest mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 26–29. (in Chinese)
- [18] 任维义, 杨映忠, 李世贵. 小型整秆刀片式甘蔗剥叶机的设计[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2005(4): 39–41.
REN Weiyi, YANG Yingzhong, LI Shigui. The design of a small all-pole knife-like sugarcane stripper[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005(4): 39–41. (in Chinese)
- [19] 孔林, 周德俭, 谌炎辉. 新型小型甘蔗剥叶机剥叶机构设计与优化[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 124–127.
KONG Lin, ZHOU Dejian, CHEN Yanhui. Design and optimization of the leaf cleaning element for new small scale sugarcane leaf cleaner[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(2): 124–127. (in Chinese)
- [20] 陆静平. 小型甘蔗剥叶机关键元件及剥叶机理的研究[D]. 南宁: 广西大学, 1998.
LU Jingping. Research on key components and leaf stripping mechanism of small sugarcane leaf stripping machine[D]. Nanning: Guangxi University, 1998. (in Chinese)
- [21] 麻芳兰, 蒋红梅, 李尚平, 等. 整秆式甘蔗收获机剥叶断尾机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 73–78, 7.

- MA Fanglan, JIANG Hongmei, LI Shangping, et al. Design and experiment on cleaning leaves and breaking tails mechanism of whole-stalk sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 73 – 78,7. (in Chinese)
- [22] 黄博. 小型整秆式甘蔗剥叶机的设计仿真及实验研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
HUANG Bo. Design simulation and experimental study of a small whole stalk-type sugarcane blade stripping machine[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 刘庆庭, 区颖刚, 袁纳新. 甘蔗茎在弯曲荷载下的破坏[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 6 – 9.
LIU Qingting, OU Yinggang, YUAN Naxin. Bending load induced failure forms of sugarcane stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 6 – 9. (in Chinese)
- [24] 牟向伟. 弹性齿对甘蔗茎秆的动态打击力与叶鞘剥离机理研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 103 – 109.
MOU Xiangwei. Study on dynamic hitting force of elastic dentation for sugarcane stalk and mechanism of leaf sheath stripping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 103 – 109. (in Chinese)
- [25] 唐献全. 剥叶滚筒转速对采用弹簧剥叶元件的甘蔗剥叶机的影响[J]. 机床与液压, 2018, 46(10): 29 – 33.
TANG Xianquan. The influence of rotational speed of peeling rollers on the sugarcane husking machine equipped with spring husking components[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(10): 29 – 33. (in Chinese)
- [26] 沈中华, 黄博. 甘蔗收获机喂入分流系统的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 171 – 175, 182.
SHEN Zhonghua, HUANG Bo. Design and experimental study on feeding and shunting system of sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 171 – 175, 182. (in Chinese)
- [27] 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 整秆式甘蔗收获机内物流排杂高速摄影分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(3): 203 – 206.
XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Impurity discharging and logistics movement of sugarcane harvester based on high-speed photography[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(3): 203 – 206. (in Chinese)
- [28] 谢卢鑫. 甘蔗收割机切段、剥叶及断尾装置设计及参数优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
XIE Luxin. Design and parameter optimization of stalk chopping, leaf stripping and top breaking devices for siugarcane harvester[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [29] 肖宏儒, 王明友, 宋卫东, 等. 整秆式甘蔗联合收获机降低含杂率的技术改进与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 42 – 45.
XIAO Hongru, WANG Mingyou, SONG Weidong, et al. Experiments and technology improvement on reducing trash content of whole stalk sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 42 – 45. (in Chinese)
- [30] 胡金冰. 甘蔗收割后集成作业系统结构设计与作业速度仿真优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
HU Jinbing. Design and simulation optimization on integrated operating system after sugarcane harvest[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [31] 蒲明辉. 小型甘蔗收割机虚拟设计及仿真[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
PU Minghui. The virtual design and simulation for small-scale type sugarcane harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2005. (in Chinese)
- [32] 沈中华, 黄博. 新型甘蔗剥叶机仿真与试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 183 – 188.
SHEN Zhonghua, HUANG Bo. Simulation and experimental study on the new sugarcane stripping harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 183 – 188. (in Chinese)
- [33] 陈争光, 王德福, 李利桥, 等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 59 – 65.
CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 59 – 65. (in Chinese)