

整秆分步式甘蔗除杂机断尾机构改进与参数优化

谭识朝,陆静平

(广西大学 机械工程学院,广西 南宁 530004)

[摘要] **【目的】**优化改进整秆分步式甘蔗除杂机的断尾机构,为解决甘蔗断尾效果差及提高断尾合格率提供支持。**【方法】**针对整秆分步式甘蔗除杂机的核心断尾机构进行优化设计,利用甘蔗尾部强度远低于其他部分的特性,提出一种新型交错齿状辊筒结构。基于 ANSYS 建立了甘蔗与辊筒的柔性多体耦合动力学模型,以最大主应力为评价指标,通过虚拟正交试验对辊筒中心距、转速及交错角进行优化匹配;最后通过物理样机的田间试验,在不同喂入量条件下,以最佳断尾率、合格断尾率以及蔗茎主体破损率为评价指标,验证仿真优化结果的正确性与新机构的实际效能。**【结果】**仿真优化结果表明,基于新型交错齿状辊筒结构的甘蔗除杂机核心断尾机构使甘蔗受力更均匀,甘蔗 Z 向位移显著降低,由改进前的 $-115\sim-156$ mm 降至 $-84\sim-63$ mm,受力状态显著改善。通过正交试验明确了各因素的主次影响顺序,获得的最优参数组合为:辊筒中心距 303 mm,转速 218 r/min,交错角 13° ,此时甘蔗最大主应力为 11.390 8 MPa。田间试验证实,改进后机构在单根喂入时的合格断尾率达 95.34%,4 根喂入时达 89.76%,较改进前的 83.40% 提高了 6.36 个百分点;各工况下蔗茎主体破损率均低于 0.50%。**【结论】**基于交错齿状辊筒的甘蔗除杂机断尾结构能有效优化甘蔗受力状态,提升断尾性能,优化后的断尾结构能够满足整秆分步式甘蔗除杂机的断尾作业要求。

[关键词] 甘蔗除杂机;分步式;断尾机构;齿状辊筒;参数优化

[中图分类号] S225.5+3

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2027)03-0170-11

Improvement and parameter optimization of tail-breaking mechanism for whole-stalk step-by-step sugarcane impurity remover

Tan Shichao, Lu Jingping

(School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: **【Objective】** This study aims to improve and optimize the tail-breaking mechanism of a whole-stalk step-by-step sugarcane impurity remover, thereby providing support for solving the problem of poor tail-breaking performance and improving the qualified rate. **【Method】** To optimize the core tail breaking mechanism of the whole-stalk step-by-step sugarcane impurity remover, this study proposes a novel staggered-tooth roller structure that exploits the fact that the strength of the sugarcane tail is significantly lower than that of the rest of the stalk. Based on ANSYS, a flexible multi-body coupling dynamic model of sugarcane and roller was established. With the maximum principal stress as the evaluation index, the center distance, rotational speed and stagger angle of the roller were optimally matched by virtual orthogonal tests. Finally, field experiments were conducted on the physical prototype under varying feeding rates to validate the simulation-based optimization results

[收稿日期] 2026-01-09 **[修回日期]** 2026-02-10

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51965003);广西重点研发计划项目(桂农科 AB241484037)

[作者简介] 谭识朝(1998—),男,广西南宁人,硕士,主要从事甘蔗收获机械研究。E-mail:15507886496@163.com

[通信作者] 陆静平(1966—),男,广西南宁人,副教授,博士,主要从事农业机械化关键技术与装备研究。E-mail:jingpinglu@163.com

and the practical effectiveness of the new mechanism. The evaluation indexes included the maximum attainable tail-breaking rate, the qualified tail-breaking rate, and the stalk body damage rate. 【Result】 Simulation-based optimization results indicate that the core tail-breaking mechanism with the novel staggered-tooth roller structure enables more uniform stress distribution on sugarcane stalks and effectively reduces the Z-direction displacement, from $-115-156$ mm to $-84-63$ mm, demonstrating a marked improvement in stress state. The orthogonal test revealed the order of significance among the influencing factors. The optimal parameter combination was determined as a roller center distance of 303 mm, a rotational speed of 218 r/min, and a stagger angle of 13° , under which the maximum principal stress of the sugarcane stalk was 11.390 8 MPa. Field experiments confirmed that the improved mechanism achieved qualified tail-breaking rates of 95.34% for single-stalk feeding and 89.76% for four-stalk feeding, representing an increase of 6.36 percentage points over the pre-improvement rate of 83.40%. Meanwhile, the main-stalk damage rate remained below 0.50% across all operating conditions. 【Conclusion】 The staggered-tooth roller-based tail-breaking mechanism can effectively optimize the stress distribution on the sugarcane stalk and improve the tail-breaking performance. The optimized design can meet the requirements of the whole-stalk step-by-step sugarcane impurity remover.

Key words: sugarcane impurity remover; step-by-step; tail-breaking mechanism; toothed roller; parameter optimization

甘蔗含杂率严重影响榨糖品质,在进入工厂加工前需去除杂质,其中甘蔗尾部的含糖量较低,属于需去除的主要杂质,因此需要在收获后进行去除^[1]。当前我国甘蔗的去杂质作业仍依赖人工,其劳动量约占收获总劳动量的60%,随着农村劳动力人口减少,甘蔗收获成本越来越高^[2-3]。因此,推动我国甘蔗除杂机械化对我国制糖产业有十分重要的实际意义^[4-5]。

目前,国外甘蔗收获以切段收获模式为主,该方式要求切段后的甘蔗必须及时加工,以防止糖分的迅速损失^[6-7]。然而,我国南方蔗区地形复杂、种植分散,难以满足其严格的时效性要求,因此该模式在国内推广受限^[8-9]。相比之下,整秆分步式采收更适应我国生产条件,即在分散蔗区同步完成收割、断尾与集运,更便于蔗尾的资源化利用^[10-11]。但是目前的甘蔗整秆分步式除杂机械在断尾环节存在明显不足,主要表现为断尾质量差、含杂率高,导致收获后仍需投入大量人工进行二次处理,极大增加了作业成本。因此,系统优化断尾机构,从而提升断尾合格率并降低含杂率,是推动甘蔗整秆分步式收获技术发展的关键环节。

针对整秆甘蔗除杂机断尾率偏低这一难题,国内学者展开了大量研究。麻芳兰等^[12]提出了三角形布局方式的断尾机构,并通过正交试验得到该机构的较优参数组合,但是该研究遵循物理试验路径,开发周期长、成本高。谢卢鑫等^[13]设计了一种

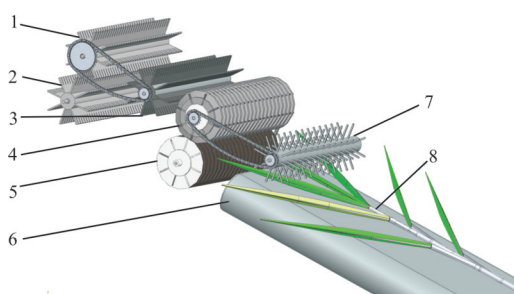
下辊筒为凹槽型的断尾机构,使用ADAMS软件进行了正交试验和虚拟仿真试验。罗菊川等^[14]设计了一种上下辊筒均为凹凸对应交错可调的弹性条,可以针对不同甘蔗型号调整辊筒中心距,经过台架试验得到了最佳断尾率为63%。赖晓等^[15]对甘蔗小型收获断尾机构的断尾过程进行了原理分析,并提出通过增加耙叶机构来改进断尾功能,断尾率提升到了82%。

综上所述,断尾率偏低的难题依然存在,现有研究对其内部力学机理的分析尚不充分。在已有仿真研究中,多采用多体动力学软件(如ADAMS),其优势在于分析机构整体的运动状态,然而对于甘蔗断尾过程中涉及的瞬态接触变形、非线性接触等复杂力学行为,其模拟精度尚较为有限。为此,本研究设计了一种交错齿状结构的辊筒,基于ANSYS仿真平台,构建甘蔗与辊筒的柔性多体耦合动力学模型模拟断尾过程中的甘蔗受力情况,对影响因素进行虚拟正交试验,并在物理样机中进行验证,以期为解决甘蔗收获机械的断尾难题提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整机结构

整秆分步式甘蔗除杂机可以实现整秆甘蔗的连续输送、蔗叶剥除及断尾处理,其核心部件包括甘蔗传送带、碎叶辊筒、上输入辊筒、下输入辊筒、上断尾辊筒、下断尾辊筒以及剥叶辊筒等(图1)。



1. 上断尾辊筒; 2. 下断尾辊筒; 3. 剥叶辊筒; 4. 上输入辊筒;
5. 下输入辊筒; 6. 甘蔗传送带; 7. 碎叶辊筒; 8. 甘蔗。
1. Upper tail-breaking roller; 2. Lower tail-breaking roller;
3. Leaf stripping roller; 4. Upper feed roller; 5. Lower feed roller;
6. Sugarcane conveyor belt; 7. Leaf crushing roller; 8. Sugarcane stalk.

图 1 整秆分步式甘蔗除杂机结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the whole-stalk step-by-step sugarcane impurity remover

该机的工作原理主要是使用机械抓手将收割后的整秆甘蔗放入设备的传送带中,经过传送带的分流,甘蔗尾部先经过碎叶机构去除部分蔗叶;随后甘蔗进入一对输入辊筒中,在其夹持作用下将甘蔗前端的蔗叶部分推入到剥叶辊筒,利用速度差产生的撕扯完成剥叶作业;最后,甘蔗进入到断尾辊筒之间,通过上下辊筒的不断旋转击打,利用甘蔗尾部的抗拉强度远低于中部的特性^[16-17],在不损伤甘蔗中部及基部的同时将甘蔗尾部分离出来,甘蔗通常会在末端约 30 mm 处断裂。该设备的断尾机构还起到了甘蔗输送的作用,能将断尾之后的甘蔗输送到收集装置。

1.2 断尾辊筒存在的问题以及改进

甘蔗断尾是利用辊筒高速旋转的拍击对蔗尾施加瞬时弯折力,但是在此时蔗茎呈悬臂梁状态^[18],且尾段受到冲击后极易产生垂直跳动和水平摆动,导致弯折点沿轴向漂移,出现“尾段未断而中段已裂”或断点参差不齐的情况,因此断尾机构要保证甘蔗在断尾过程的跳动或摆动尽可能小^[19]。目前,整秆分步式甘蔗断尾机构采用的是图 1 中上下均为梳齿状的断尾辊筒结构,该结构设计与罗菊川等^[14]所提出的方案相似,采用上下单层齿状滚刷,甘蔗在断尾过程中仍可以上下窜动,并且单层结构也容易使得甘蔗在水平方向上稳定性不足,因此该结构存在辊刷击打力不足、甘蔗窜动等缺点,导致断尾效果较差。

根据目前整秆分步式甘蔗除杂机断尾机构的特点,本研究设计了一种新型辊筒结构如图 2 所示。其中上辊筒设计为橡胶材质的断尾板,主要起到了击打甘蔗的作用;下辊筒设计为橡胶材质的双

层交错齿状辊筒,以有效限制甘蔗的跳动或摆动范围,并且双层结构也能通过增加辊筒面与甘蔗的接触面积,进而确保辊筒对甘蔗作用力的稳定传递。橡胶滚刷均匀分布在金属辊筒周边,一共有 8 排,两者通过螺栓连接。下辊筒齿状间隙为 10 mm,双层齿状间隙间隔 8 mm,两排齿状结构交错排布。该结构能提供稳定有效的击打力,同时对甘蔗起到一定的夹持作用。

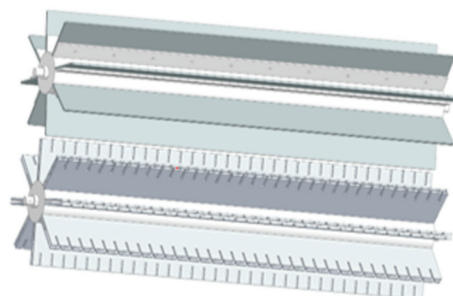
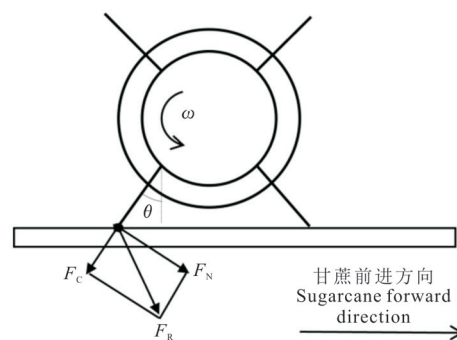


图 2 交错齿状断尾辊筒的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of staggered-tooth tail-breaking roller

2 断尾机理分析

为了讨论甘蔗断尾时的影响因素,对甘蔗进行受力分析,以甘蔗与断尾辊筒接触点作为分析对象,结果如图 3 所示。图 3 显示,甘蔗受力主要包括:辊筒刷产生的离心力 F_C 、辊筒对甘蔗的径向力 F_N ,以及二者接触面之间的摩擦力 F_R 。



F_C 为辊筒刷产生的离心力; F_N 为辊筒对甘蔗的径向力; F_R 为 F_C 和 F_N 的合力; ω 为辊筒绕旋转中心的角速度; θ 为离心力与辊筒-甘蔗接触面法线夹角。

F_C represents the centrifugal force generated by the roller brush. F_N denotes the radial force exerted by the roller on sugarcane stalk.

F_R signifies the resultant force of F_C and F_N . ω stands for the angular velocity of the roller around its rotation center. θ indicates the angle between the centrifugal force and the normal to the roller-sugarcane contact surface.

图 3 甘蔗断尾过程受力分析

Fig. 3 Force analysis of sugarcane tail-breaking process

由图3可知,甘蔗受到的离心力 F_C 可表示为:

$$F_C = mr\omega^2. \quad (1)$$

式中: F_C 为甘蔗受到的离心力,N; m 为甘蔗的质量,kg; r 为辊筒旋转半径,m; ω 为辊筒绕旋转中心的角速度,rad/s。

甘蔗断尾过程中,辊筒与甘蔗的相互作用可近似简化为圆柱-圆柱正交线接触。为分析甘蔗的断尾力学机理,对该接触过程的受力分布进行分析。在断尾冲击的瞬间,甘蔗处于断尾前的临界力学状态,接触区域主要处于微小弹性变形阶段,在此阶段甘蔗可近似视为线弹性体^[20]。同时,接触区的变形量远小于接触尺寸,满足小变形假设。基于此,本研究采用Hertz线接触理论^[21]对关键参数的影响进行参数化分析。根据该理论,在径向力 F_N 作用下产生的弹性量趋近,即压陷深度 δ 可表示为:

$$\delta = \left(\frac{3F_N}{4\pi E^* R^*} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

式中: E^* 表示等效弹性模量,MPa; R^* 表示等效曲率半径,m。

由式(2)直接反解便得径向力 F_N 为:

$$F_N = \frac{4\pi E^* R^* \delta^3}{3}. \quad (3)$$

其中:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (5)$$

式中: E_1 为甘蔗弹性模量,Pa; E_2 为橡胶辊筒弹性模量,Pa; ν_1 为甘蔗泊松比; ν_2 为橡胶辊筒包胶泊松比; R_1 为甘蔗外圆半径,m; R_2 为橡胶辊筒在甘蔗接触点的外圆半径,m。

甘蔗所受 F_C 和 F_N 的合力 F_R 可表示为:



1. 尾部;2~3. 中部;4. 基部。1. Tail section;2-3. Middle section;4. Basal section.

图4 甘蔗几何模型分段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of segmented sugarcane geometric model

在ANSYS中,通过自由网格划分的方法对甘蔗整体进行网格划分,对甘蔗表面采用Face Meshing进行网格细化处理。仿真分析中甘蔗的材料参数设置如下:甘蔗密度根据试验样品实测值设定为 1100 kg/m^3 ,关键力学参数则来源于对本试验甘蔗样本的力学测试。力学测试使用万能材料试验机,

$$F_R = \sqrt{F_C^2 + F_N^2} = \sqrt{(mr\omega^2)^2 + \left(\frac{4\pi E^* R^* \delta^3}{3} \right)^2}. \quad (6)$$

摩擦力 F_f 可表示为:

$$F_f = f \times N, \quad (7)$$

$$N = mg + F_C \cos \theta + F_N \sin \theta. \quad (8)$$

式中: f 为甘蔗与辊筒刷之间的摩擦系数; N 为辊筒刷对甘蔗的压力,N; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; θ 为离心力与辊筒-甘蔗接触面法线夹角,rad。

基于以上分析,离心力 F_C 与辊筒转速的平方直接相关,转速越高,离心力越大,辊筒对甘蔗尾部的冲击作用越强。由式(3)可知,径向力 F_N 与等效弹性模量 E^* 及压陷深度 δ^3 均呈正比关系。其中, E^* 取决于甘蔗与辊筒的材料弹性性质,辊筒弹性模量是影响 E^* 的关键因素之一;而压陷深度 δ 则取决于甘蔗与辊筒之间的啮合程度,即两者的交错深度,该深度由辊筒中心距和交错角共同控制。由式(7)和(8)可知,摩擦力 F_f 与径向力 F_N 相关,其大小同样受到上述参数的影响。

3 断尾机构虚拟仿真以及试验

3.1 甘蔗模型参数设定

甘蔗在进入断尾机构前已经完成部分剥叶工序,且剩余部分蔗叶的刚度远小于蔗茎,蔗叶对断尾影响可以忽略不计^[22],所以本研究只考虑蔗茎结构。根据实际测量,甘蔗长度为 $2.2 \sim 2.8 \text{ m}$ 。用UG建立甘蔗几何模型,取甘蔗高度为 2.5 m ,梢部直径为 20 mm ,中部直径为 30 mm ,梢部到中部的直径由 20 mm 逐步增大到 30 mm ,两者大小连接平顺过渡。由于甘蔗不同区段的力学性能不同,可将其如图4所示划分为4段。

对甘蔗茎秆不同部位试样进行了准静态压缩测试。基于测试结果,在仿真中将甘蔗模型按部位分段设置材料属性,具体参数值如表1所示。甘蔗的断尾过程中会发生微小形变,如果将甘蔗设置为刚体会导致仿真结果误差较大,因此需要将甘蔗的Body属性设置为柔性体,并且在Body properties中设置模

态阶数为 25,完成甘蔗的柔性化。

表 1 甘蔗几何模型分段参数的设定

Table 1 Parameters of segmented sugarcane geometric model

区段 Section	弹性模量/MPa Elastic modulus	泊松比 Poisson's ratio	区段 Section	弹性模量/MPa Elastic modulus	泊松比 Poisson's ratio
1(尾部 Tail section)	400	0.40	3(中部 Middle section)	800	0.38
2(中部 Middle section)	600	0.38	4(基部 Basal section)	1 000	0.35

3.2 断尾机构模型的参数设定

辊筒与甘蔗接触时,对于辊筒产生的主要是面向拉伸力,而厚度方向的切变形远远小于面向变形,如果将辊筒设置为实体单元,则在厚度方向需要划分 4 层以上的网格,这将使整体网格密度非常大,进而导致求解效率较低。因辊筒刷的厚度远小于其长度和宽度,符合壳单元的薄壁假设^[23],因此在 ANSYS 前处理阶段将断尾辊筒设定为壳单元(图 5)。在后续仿真中,需设置壳单元的厚度属性,并定义其 TOP 面和 BOTTOM 面及甘蔗之间的摩擦参数。

辊筒材质选用丁腈橡胶(NBR),鉴于其良好的耐磨性与适中的弹性,能够满足断尾过程中对辊筒表面耐久性与缓冲能力的要求。仿真中设置该材料的参数为:弹性模量 11 MPa,密度 900 kg/m³,泊松比 0.45,并按照以上方法将橡胶辊筒进行柔性化设置。图 6 所示为辊筒平面图,其中 h 为上下辊筒中心距离, α 为辊筒之间的交错角度,这 2 个变量影响甘蔗

断尾时辊筒橡胶的形变。因此,为确定正交试验的参数水平范围,本研究初步设定上下辊筒的中心距 $h=300$ mm、辊筒交错角度 $\alpha=9^\circ$,作为仿真分析的基准工况,后续以该参数作为变量开展讨论。

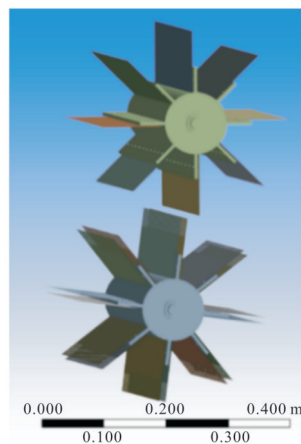
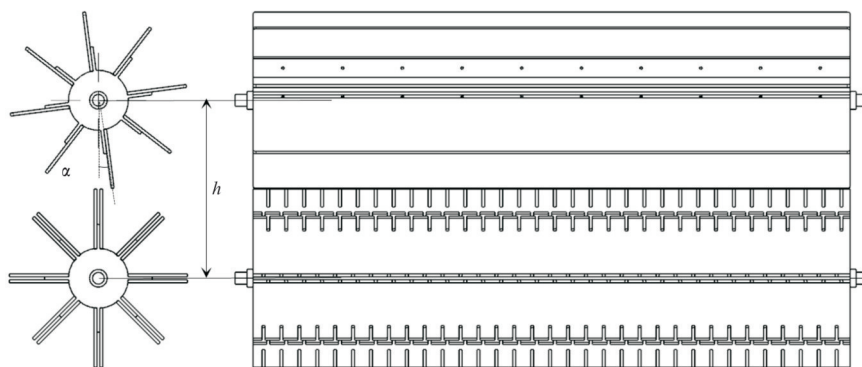


图 5 甘蔗断尾辊筒 ANSYS 的壳单元设置

Fig. 5 Shell element settings of sugarcane tail-breaking roller in ANSYS



h 为上下辊筒中心距离; α 为辊筒之间的交错角度。

h represents the center-to-center distance between the upper and lower rollers. α denotes the stagger angle between the rollers.

图 6 甘蔗断尾机构中辊筒的平面示意图

Fig. 6 Plan sketch of rollers in the sugarcane tail-breaking mechanism

3.3 改进前后仿真结果的对比

断尾效果取决于甘蔗尾部的拉压力大小,甘蔗尾部断裂通常变形量极小,并且断口整齐,其断裂行为可近似视为脆性材料的拉应力失效^[24-25]。因此最大主应力是引发断裂的关键判据,仿真的目的是对比改进前后两个断尾机构的最大主应力。将甘

蔗初始速度设置为 1 000 mm/s,上下断尾辊筒转速设为 125 r/min,设定接触刚度系数为 100 kN/mm,最大穿透值 0.1 mm,甘蔗与辊筒之间的摩擦系数为 0.2,仿真时长设置 0.5 s,步长 100 步。

为充分验证仿真结果的网格无关性,本研究针对几何结构较为复杂的改进模型展开分析。选取

最大主应力作为关键考察指标,设置了4种不同密度的网格方案进行对比,并以单元数量最多模型的求解结果为基准,计算不同网格方案的相对偏差,具体计算结果如表2所示。表2表明,当网格数量

为120 773时,继续增加网格密度之后,最大主应力变化不大,表明已充分收敛。因此,本研究选定网格3方案,采用约12万网格单元用于后续仿真分析,从而在保证结果可靠性的同时控制计算成本。

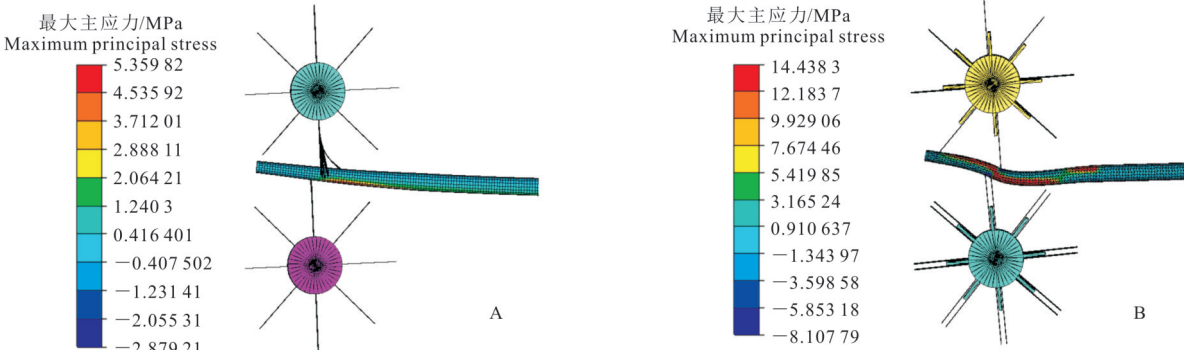
表2 不同网格方案时最大主应力的变化

Table 2 Variation of the maximum principal stress under different mesh schemes

方案 Plan	网格单元数 Number of mesh elements	最大主应力/MPa Maximum princi- pal stress	偏差/% Deviation	方案 Plan	网格单元数 Number of mesh elements	最大主应力/MPa Maximum princi- pal stress	偏差/% Deviation
1	43 793	14.250	1.35	3	120 773	14.438	0.10
2	84 988	14.424	0.14	4	160 766	14.445	—

图7为改进前后甘蔗断尾过程受力情况仿真分析的应力云图。需要说明的是,ANSYS Motion后处理求解器得到的应力单位为N/mm²,但最终均换算为MPa。由图7-A可知,改进前甘蔗受到的最大主应力峰值仅5.3 MPa,高应力区占比小于15%,应力水平较低,甘蔗处于最佳断尾区域时甘蔗形变较

小,与实际作业中断尾失败率高的现象吻合。改进之后的最大主应力为14.4 MPa,受力点清晰,同时受到拉力与压力的作用。图7-B显示,大于10 MPa的高拉应力区域扩大至50%左右,形成清晰的轴向拉伸-横向剪切复合断裂带,断裂位置与甘蔗尾部常见的断裂形态相符。

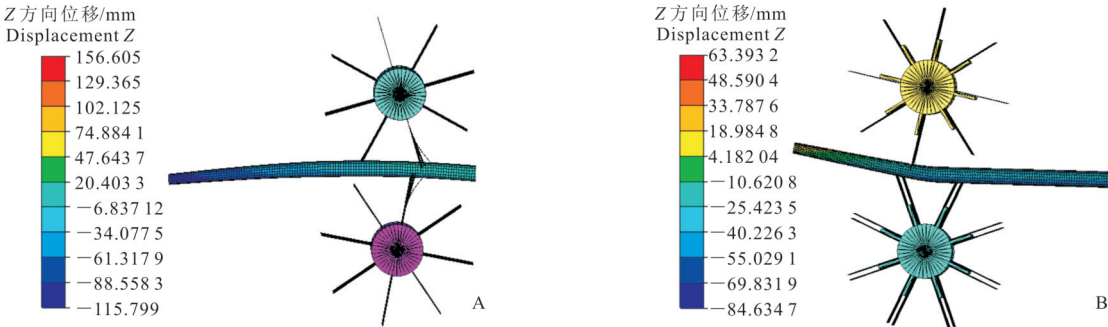


A. 改进前受力;B. 改进后受力。A. Stress distribution before improvement;B. Stress distribution after improvement.
图7 断尾过程中甘蔗受力情况的仿真分析

Fig. 7 Simulation analysis of the stress distribution on the sugarcane stalk during tail-breaking process

改进前断尾机构上下辊筒均为单层滚刷结构,对甘蔗的夹持作用较弱,导致甘蔗断尾过程中容易发生上下跳动或左右摆动,这也是甘蔗整体受力较小的原因之一。图8所示为改进前后甘蔗断尾过程位移的仿真分析结果。从图8的位移云图可以看

出,在甘蔗运行过程中,甘蔗在Z方向(竖直方向)上产生了较大的位移波动,其位移量为-115~156 mm;相较之下,改进之后的断尾机构位移量更小,为-84~63 mm。由此可知,改进之后的甘蔗断尾机构可以增加甘蔗断尾过程的稳定性。



A. 改进前位移;B. 改进后位移。A. Displacement distribution before improvement;B. Displacement distribution after improvement.
图8 断尾过程中甘蔗位移的仿真分析

Fig. 8 Simulation analysis of sugarcane stalk displacement during tail-breaking process

3.4 参数优化设计仿真

基于上述断尾机理分析可知,甘蔗-辊筒间交错深度和辊筒转速是决定甘蔗断尾质量的主要因素,其中交错深度由上下辊筒中心距以及辊筒交错角共同决定,直接影响甘蔗茎秆的啮入条件与受力状态,而辊筒转速则是决定甘蔗击打频率以及冲击力大小的运动参数。为了确定最佳断尾参数,本研究选取辊筒转速(因素A)、辊筒中心距(因素B)和辊筒交错角(因素C)作为考察因素,设计了虚拟仿真正交试验。各因素的水平均依据前期理论分析、预备试验及实际约束综合确定。在正式试验前,基于已建立的柔性多体耦合动力学模型进行了单因

素预分析。以转速为例,在中心距 300 mm、交错角 9° 的基准工况下,分别以 200, 210, 218, 228, 238 r/min 进行预仿真分析,以最大主应力为观测指标。结果表明:当转速低于 218 r/min 时,甘蔗所受最大主应力波动较大;当转速达到 218 r/min 及以上时,最大主应力趋于稳定。因此,将正式正交试验的转速下界设定为 218 r/min。其余因素的水平,同样基于预备试验所确定的稳定有效范围,并兼顾设备自身的调节范围与机械约束进行设定,以确保所有试验点均位于具有工程意义的优化空间内,最终设定的各因素及水平如表 3 所示。

表 3 甘蔗断尾质量影响因素及水平的设定

Table 3 Influencing factors and level settings for sugarcane tail-breaking quality

水平 Level	断尾辊筒转速(A)/(r·min ⁻¹) Rotational speed of tail-breaking roller(A)	辊筒中心距(B)/mm Roller center distance(B)	辊筒交错角(C)/(°) Roller stagger angle (C)
1	218	298	5
2	228	303	9
3	238	308	13

以甘蔗断尾过程中所受最大主应力作为评价指标,按 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,每个试验方案均设 3 次独立重复。通过记录甘蔗断尾过程中的最大主

应力,计算各方案下该指标的算术平均值作为最终试验值。正交试验方案及相应指标的测定结果如表 4 所示。

表 4 甘蔗断尾质量影响因素正交试验方案及结果

Table 4 Orthogonal test scheme and results for influencing factors of sugarcane tail-breaking quality

序号 No.	断尾辊筒转速(A)/(r·min ⁻¹) Rotational speed of tail-breaking roller(A)	辊筒中心距(B)/mm Roller center distance(B)	辊筒交错角(C)/(°) Roller stagger angle (C)	最大主应力/MPa Maximum principal stress
1	218	298	5	16.52
2	218	303	9	11.64
3	218	308	13	6.51
4	228	298	9	16.83
5	228	303	13	13.25
6	228	308	5	10.37
7	238	298	13	21.01
8	238	303	5	16.32
9	238	308	9	12.26

甘蔗尾部的抗破坏强度约为 8 MPa^[13],同时需低于中部及基部的破坏应力值约 17 MPa^[13]。鉴于甘蔗作为生物复合材料,其强度受到其维管束数量、分布及木质化程度等的影响,导致了其宏观强度必然存在固有的统计分散性^[25]。基于可靠性设计准则,为覆盖此种强度波动并应对动态冲击,本研究将尾部设计应力阈值设定为 10 MPa,中部许用应力设定为 15 MPa。由此,最大主应力在 10~15 MPa 时为最佳受力区间,该区间既能保证断尾的效率,又可以兼顾甘蔗中部的完整性。

基于表 4 的正交试验结果,采用单因素方差分

析法考察断尾机构 3 个参数对最大主应力影响的显著性,方差分析结果如表 5 所示。表 5 结果表明,因素 B 与因素 A 对最大主应力具有显著影响,而因素 C 影响不显著。该结果表明,影响甘蔗断尾过程的参数重要性依次为:辊筒中心距>断尾辊筒转速>辊筒交错角。根据各因素不同水平下最大主应力的均值分布,并结合 10~15 MPa 的最优受力区间要求,在满足辊筒转速较低与安装角度最优条件下,正交试验结果确定的较优参数组合为 $A_1B_2C_3$,即断尾辊筒转速为 218 r/min,辊筒中心距为 303 mm,辊筒交错角为 13° ,该组合下最大主应力的预测值约为

11 MPa,处于目标区间内。设置该水平下的验证试验,结果(图 9)显示,在该条件下,甘蔗受到的最大主应力为 11.390 8 MPa,与预测值误差较小,该转速(218 r/min)在 3 个转速水平中最低,且能满足断尾的力学要求。

表 5 甘蔗断尾质量影响因素正交试验结果的方差分析

因素 Factor	SS	自由度 Freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性 Significance
A	37.73	2	18.86	12.65	0.075	**
B	106.08	2	53.04	35.57	0.028	**
C	1.34	2	0.67	0.45	0.680	
误差 Error	1.99	2	0.995			
总和 Total	147.13	8				

注:**表示在 $\alpha=0.05$ 水平上影响显著。
Note:** indicates significance at $\alpha=0.05$.

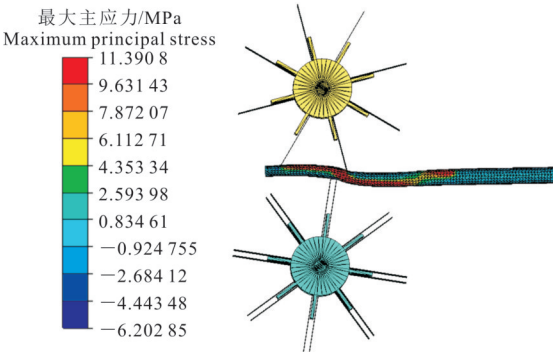


图 9 甘蔗断尾过程中受力情况的仿真分析
Fig. 9 Simulation analysis of force conditions during the sugarcane tail-breaking process

4 田间验证试验

4.1 试验方案与部署

通过田间试验对比改进前后甘蔗断尾机构作业性能的差异,试验装置如图 10 所示,试验地址位于广西柳州地保公司试验基地。选取同一批次、成熟度相近的桂糖 44 号甘蔗作为样品,所有样本在试验前均经过表观筛选,剔除了明显弯曲或损伤的个体。样本间变异系数小于 5%,满足 JB/T 6275—2007《甘蔗收获机械试验方法》对同批次样本的一致性要求。田间试验的核心目的在于验证基于仿真分析与参数优化所获得的新机构,能否有效提升甘蔗断尾作业的质量。

试验参数设定为:断尾辊筒转速为 218 r/min,辊筒中心距为 303 mm,辊筒交错角为 13°,其余参数均按照正常使用值进行设定。为评估不同喂入量条件下机构的断尾效果,设定甘蔗单次喂入量分为 1~4 根共 4 种工况,每种工况的试验方案如下:完成一组包含 100 次连续断尾作业试验后,将该组试验

独立重复进行 4 次。据此,累计完成有效断尾作业 1 600 次。该设计通过设置多次重复与较大样本规模,有助于控制随机误差,从而为后续性能的统计比较提供可靠依据。通过对比分析各组试验结果,可明确改进后机构在不同喂入负荷下的作业性能与稳定性。



图 10 甘蔗除杂机断尾试验装置
Fig. 10 Tail-breaking test device of sugarcane impurity remover

4.2 试验指标

参考 JB/T 6275—2007《甘蔗收获机械试验方法》,使用最佳断尾率(Y_1)、合格断尾率(Y_2)和蔗茎主体破损率(Y_3)作为试验指标。各指标的定义为:在甘蔗蔗尾部生长点之下长度 212 mm±57 mm 的 4~6 节处折断且包含青叶包裹的甘蔗尾部得以去除,则该断尾效果质量最好,定义为最佳断尾;若在甘蔗生长点到第 6 节之间断裂,定义为合格断尾^[14]。另外,甘蔗在生长点到第 6 节以上位置出现可见裂纹、压溃、劈裂等机械损伤,定义为蔗茎主体破损。各指标的计算方法如下。

$$Y_1 = \frac{n_1}{N_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中: n_1 为 4~6 节处成功断尾的根数; N_1 为每组甘蔗的总数。

$$Y_2 = \frac{n_2}{N_2} \times 100\% \quad (10)$$

式中: n_2 为 0~6 节处成功断尾的根数; N_2 为每组甘蔗的总数。

$$Y_3 = \frac{n_3}{N_3} \times 100\% \quad (11)$$

式中: n_3 为 6 节以上处出现机械损伤的根数; N_3 为每组甘蔗的总数。

4.3 改进前后试验结果的对比与分析

经过田间试验,得到了改进前后甘蔗断尾机构的断尾试验数据如表 6 所示。由表 6 可知,改进之后断尾机构的断尾率有明显提高。随着喂入甘蔗

数量的增加,断尾率呈缓慢下降趋势,单根喂入时最佳断尾率和合格断尾率最高,2 根及 3 根喂入时略微下降,而当喂入量增加至 4 根时,最佳断尾率和合格断尾率均有明显下降,但也维持在一个相对较高的水平。与改进前相比,改进之后的最佳断尾率在甘蔗喂入量为 4 根时提升了 11.85 个百分点,达到了 79.98%;合格断尾率较改进前提升了 6.36 个百分点,达到了 89.76%。其他喂入量下,断尾率也均较改进前有所提高。同时,甘蔗主体破损率被控制在极低水平,最高不足 0.50%,且随着喂入数量增加而进一步降低。综上所述,断尾机构改进后的甘蔗除杂机的断尾率有明显提高,特别是 2 根或 3 根喂入时可在保证较高断尾率的同时,将含杂率控制在较低水平,是较优的作业条件。后续研究可在此基础上进一步优化甘蔗分流喂入策略,以提升甘蔗断尾机构的综合性能。

表 6 甘蔗断尾机构改进前后试验结果的比较

Table 6 Comparison of test results before and after improvement of sugarcane tail-breaking

喂入根数 Feeding stalk number	改进前 Before improvement			改进后 After improvement		
	最佳断尾率/% Optimum tail- breaking rate	合格断尾率/% Qualified tail- breaking rate	蔗茎主体 破损率/% Sugarcane stem damage rate	最佳断尾率/% Optimum tail- breaking rate	合格断尾率/% Qualified tail- breaking rate	蔗茎主体 破损率/% Sugarcane stem damage rate
1	75.23	89.11	0.26	82.34	95.34	0.42
2	73.87	87.37	0.18	81.76	94.30	0.35
3	72.45	86.28	0.14	80.78	92.74	0.24
4	68.13	83.40	0.10	79.98	89.76	0.17

5 结 论

1) 针对传统分步式甘蔗除杂机断尾机构存在的击打力不足与断尾效果差等问题,设计了一种交错齿状辊筒的断尾机构。通过 ANSYS 仿真分析表明,与传统机构相比,该新型结构能使甘蔗受力分布更为均匀,拉压应力区分更清晰,在同等条件下施加的力更大,从而显著提升了断尾效果。

2) 通过虚拟正交试验发现,甘蔗断尾结果影响因素的重要性依次表现为辊筒中心距>断尾辊筒转速>断尾辊筒交错角。在辊筒中心距为 303 mm,转速为 218 r/min,辊筒交错角为 13°时,断尾效果最佳,在此最优组合下,甘蔗受到的主应力最大为 11.390 8 MPa,既满足了甘蔗断尾需求,也使蔗茎主体破损率不超过 0.50%。

3) 田间验证试验表明,改进后的断尾系统有更好的断尾效果,合格断尾率达到了 89% 以上,较改进前提升了 6.36 个百分点,试验结果与仿真预测趋势一致。新型交错齿状辊筒结构能显著优化甘蔗

的受力状态,使其载荷更高、分布更均匀,从而在实际作业中实现了断尾合格率的提升。上述结果证实,交错齿状辊筒结构优化是提升甘蔗断尾性能的有效途径。

[参考文献]

- [1] 刘庆庭,黄瑶,蒋姣丽,等. 甘蔗机械化收获技术与装备研究综述[J]. 农业机械学报,2024,55(12):1-21.
Liu Q T, Huang Y, Jiang J L, et al. Technology and equipment of sugarcane harvesting mechanization review[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):1-21.
- [2] 陈立创. 我国甘蔗机械化收获技术发展综述[J]. 南方农机, 2022, 53(16):34-38.
Chen L C. Development of sugarcane mechanized harvesting technology in China[J]. South Agricultural Machinery, 2022, 53(16):34-38.
- [3] 肖威,陆静平. 甘蔗机械化收获技术现状分析[J]. 中国农机化学报,2022,43(2):50-59,142.
Xiao W, Lu J P. Analysis of sugarcane mechanized harvesting technology[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Che-

- mistry, 2022, 43(2): 50-59, 142.
- [4] 韦敬楠. 机械化对广西农户甘蔗生产效率的影响[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 216-222.
- Wei J N. Influence of mechanization on sugarcane production efficiency of farmers in Guangxi[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2019, 40(9): 216-222.
- [5] 李明春, 张顺生, 李啸宇, 等. 中国甘蔗收割机的发展现状与展望[J]. 热带农业科学, 2025, 45(1): 126-132.
- Li M C, Zhang S S, Li X Y, et al. Development status and prospect of sugarcane harvester in China[J]. Tropical Agricultural Sciences, 2025, 45(1): 126-132.
- [6] Huo P, Ma S C, Su C Y, et al. Sugarcane leaf-stalk separating technology: a critical review[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 120-148.
- [7] 王智能, 杨柳, 杨婷, 等. 不同机械化收获方式对甘蔗原料贮存品质影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41(5): 79-85.
- Wang Z N, Yang L, Yang T, et al. Effects of different mechanical harvesting methods on the storage quality of sugarcane raw materials[J]. Tropical Agricultural Sciences, 2021, 41(5): 79-85.
- [8] 刘庆庭, 徐鹏, 武涛, 等. 甘蔗整秆立式联合收获机割前剥叶装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(11): 74-82.
- Liu Q T, Xu P, Wu T, et al. Design and experiment of leaf stripping device for vertical whole stalk harvester before cutting sugarcane[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(11): 74-82.
- [9] 贾笛迹, 高欣欣, 刘高源, 等. 云南省丘陵区山地甘蔗全程机械化发展的研究进展[J]. 热带农业科学, 2022, 42(2): 115-120.
- Jia D E, Gao X X, Liu G Y, et al. Research progress in the development of sugarcane mechanization in the hilly and mountainous regions of Yunnan Province[J]. Tropical Agricultural Sciences, 2022, 42(2): 115-120.
- [10] 罗词广, 王顺喜, 彭彦昆, 等. 我国甘蔗联合收割机发展中一些问题的探讨[J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 247-249.
- Luo C G, Wang S X, Peng Y K, et al. Studying on some problems of sugarcane combine harvester development in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 247-249.
- [11] 杨明东. 甘蔗分步式机收除杂模式的可行性与经济效益探究[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(3): 52-54.
- Yang M D. Study on the feasibility and economic benefits of sugarcane step-by-step machine harvesting and impurity removal mode[J]. Agricultural Disaster Research, 2024, 14(3): 52-54.
- [12] 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(6): 73-78.
- Ma F L, Jiang H M, Li S P, 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(6): 73-78.
- [13] 谢卢鑫, 胡金冰, 吴剑锋, 等. 整秆式甘蔗收获机断尾机构虚拟试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(9): 1662-1670.
- Xie L X, Hu J B, Wu J F, et al. Virtual experimental research on tail-breaking mechanism of whole-stalk sugarcane harvester[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(9): 1662-1670.
- [14] 罗菊川, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 整秆式甘蔗联合收获机断尾机构[J]. 农业机械学报, 2013(4): 89-94, 107.
- Luo J C, Ou Y G, Liu Q T, et al. Tail-breaking mechanism of whole stalk sugarcane combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013(4): 89-94, 107.
- [15] 赖晓, 杨鹏, 王伟权, 等. 小型甘蔗收获机剥叶断尾机构改进与试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(12): 166-170.
- Lai X, Yang P, Wang W Q, et al. Improvement and experiment on the leaf-cleaning and tail-breaking mechanism of the small type sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(12): 166-170.
- [16] 吴剑锋, 程绍明, 王俊, 等. 整秆甘蔗各部位切割力和糖度的差异性及其二者间相关性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 196-198, 151.
- Wu J F, Cheng S M, Wang J, et al. Cutting force and Brix content differences in all parts of the whole stalk sugarcane and their correlation research[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2014, 35(6): 196-198, 151.
- [17] 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 Q T, Ou Y G, Yuan N X. Bending load induced failure forms of sugarcane stalks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 6-9.
- [18] 汤圣尧, 林家祥, 黄健友. 大阻尼黏弹性甘蔗剥叶元件振动特性分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(9): 227-233.
- Tang S Y, Lin J X, Huang J Y. Vibration characterization analysis of a large-damped viscoelastic sugarcane defoliation element[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2025, 46(9): 227-233.
- [19] 胡金冰, 吴剑锋, 王俊. 甘蔗断尾机构工作稳定性的虚拟仿真分析与试验验证[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(4): 483-491.
- Hu J B, Wu J F, Wang J. Virtual simulation analysis and verification on working stability of sugarcane tail-breaking mechanism[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2015, 41(4): 483-491.
- [20] 马千舒, 李同杰, 薛文, 等. 甘蔗茎秆的力学特性试验分析[J]. 安徽科技学院学报, 2024, 38(5): 51-57.
- Ma Q S, Li T J, Xue W, et al. Experimental analysis of mechanical properties of sugarcane stalks[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2024, 38(5): 51-57.
- [21] 刘静, 邵毅敏, 秦晓猛, 等. 基于非理想 Hertz 线接触特性的圆柱滚子轴承局部故障动力学建模[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 91-97.
- Liu J, Shao Y M, Qin X M, et al. Dynamic modeling on localized defect of cylindrical roller bearing based on non-Hertz line

- contact characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 91-97.
- [22] 刘银丁, 杨望, 杨坚, 等. 甘蔗收获切割系统动力学仿真模型[J]. 农机化研究, 2019, 41(9): 15-20.
- Liu Y D, Yang W, Yang J, et al. Dynamics simulation model of cutting system for sugarcane harvesting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(9): 15-20.
- [23] 张居敏, 王鹏, 邓在京. 基于多薄壁圆管套装假设的圆轴扭转切应力-变形量分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2023, 41(2): 218-225.
- Zhang J M, Wang P, Deng Z J. Shear stress-deformation analysis of torsional circular shaft based on the assumption of multiple thin-walled circular tubes set[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2023, 41(2): 218-225.
- [24] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆在扭转、压缩、拉伸荷载下的破坏试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 201-204.
- Liu Q T, Ou Y G, Qing S L, et al. Failure tests of sugarcane stalks under torsion, compression and tension load[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 201-204.
- [25] 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 X W, Ou Y G, Liu Q T, et al. Elastic dentation roller type sugarcane leaf-stripping device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 60-65.
- (责任编辑: 温晓平)

(上接第 169 页)

- [33] Hayashi K I, Arai K, Aoi Y, et al. The main oxidative inactivation pathway of the plant hormone auxin[J]. Nature Communications, 2021, 12: 6752.
- [34] 梁旺利, 于雯静, 胡进红, 等. NaCl胁迫下宁夏枸杞 ABA 代谢相关基因差异表达分析[J]. 西北农业学报, 2024, 33(4): 664-672.
- Liang W L, Yu W J, Hu J H, et al. Differential expression of ABA metabolism-related genes in *Lycium barbarum* under NaCl stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(4): 664-672.
- [35] Aguilar-Hernández V, Loyola-Vargas V M. Advanced proteomic approaches to elucidate somatic embryogenesis[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1658.
- [36] 苑智华, 何秀丽, 徐哲, 等. 唐菖蒲球茎形成期蔗糖和淀粉代谢及其相关酶活性[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 47-51.
- Yuan Z H, He X L, Xu Z, et al. Metabolism and related enzymes activities of sucrose and starch in the stages of bulb formation of *Gladiolus hybridus* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(8): 47-51.
- [37] Xavier L R, Almeida F A, Pinto V B, et al. Integrative proteomics and phosphoproteomics reveals phosphorylation networks involved in the maintenance and expression of embryogenic competence in sugarcane callus[J]. Journal of Plant Physiology, 2022, 268: 153587.
- [38] Lü Z, Yu L X, Zhan H, et al. Shoot differentiation from *Dendrocalamus brandisii* callus and the related physiological roles of sugar and hormones during shoot differentiation[J]. Tree Physiology, 2023, 43(7): 1159-1186.
- (责任编辑: 屈李纯)