

宿根蔗补种机均匀排种控制系统设计与试验

李尚平^{1,2} 李 洋^{1,2} 张 彪³ 文春明^{1,2} 李凯华^{1,2}

(1. 广西民族大学电子信息学院, 南宁 530006; 2. 广西高校智慧无人系统与智能装备重点实验室, 南宁 530006;
3. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004)

摘要: 为了实现排种的均匀稳定, 针对预切种式宿根蔗补种的难题, 设计了一种宿根蔗补种机均匀排种控制系统, 由辊耙、理蔗压板、种箱以及电控系统等组成。通过运用 EDEM 对排种机构的排种过程进行仿真分析及虚拟试验, 探讨了系统主要工作参数对排种性能的影响, 对机构进行了优化设计。通过单因素试验及 Box - Behnken 响应面正交试验, 研究了辊耙角速度、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量、理蔗压板活动角对排种均匀度的影响规律, 建立了排种机构排种性能的响应面方程, 构建了排种系统参数调节的控制模型和控制算法。以种箱内蔗种数量作为控制器输入量, 控制器通过自动调整辊耙角速度和理蔗压板压力来控制排种系统排种过程的均匀性。试验结果表明, 应用参数自调节排种控制系统进行排种作业时, 排种合格率为 94.44%, 与未应用参数自调节的排种系统相比提高 8.88 个百分点; 排种均匀度为 0.46 段²。研究可为提高甘蔗宿根补种的均匀性及稳定性提供技术支持。

关键词: 宿根蔗; 补种机; 排种系统; 参数自调节; 均匀性

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0124-15

OSID:



Design and Experiment on Control System of Uniform Seed Seeding of Ratoon Cane Reseeding Machine

LI Shangping^{1,2} LI Yang^{1,2} ZHANG Biao³ WEN Chunming^{1,2} LI Kaihua^{1,2}

(1. College of Electronic Information, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China

2. Key Laboratory of Intelligent Unmanned System and Intelligent Equipment,

Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530006, China

3. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to achieve uniformity and stable seed discharge, a uniform seeding control system for ratoon cane reseeded machines was developed and designed to address the problem of pre-cut ratoon cane reseeded, which consisted of a roller rake, a cane pressure plate, a seed box and an electronic control system. By using EDEM to conduct simulation analysis and virtual tests on the seeding process of the seeding mechanism, the impact of the main working parameters of the system on the seeding performance was discussed, and the mechanism was optimized. Through the one-factor test and Box - Behnken response surface orthogonal test, the relationship between the influence of roller harrow rotational speed, cane pressurization pressure, the number of cane seeds in the seed box, and the activity angle of the cane pressurization plate on the uniformity of seed discharging was investigated, the response surface equation of the seed discharging performance of the seed discharging mechanism was established, and the control model and control algorithm for the adjustment of the parameters of the seed discharging system were constructed. Taking the remaining amount of sugarcane seeds in the seed box as the input of the controller, and the controller adjusts the roller rake speed and the pressure of the cane press to realize the uniform seeding of the seeding discharge system. The test results showed that when the parameter self-tuning seeding control system was used for seeding operations, the seeding pass rate was 94.44%, which was an increase of 8.88 percentage points compared with that of the seeding system without parameter self-tuning, and the seeding uniformity calculated based on variance was 0.46 pcs². The research result can provide theoretical technical support to improve the uniformity and stability of ratoon cane replanting.

Key words: ratoon cane; reseeded machine; seeding system; parameter self-tuning; uniformity

收稿日期: 2023-06-26 修回日期: 2023-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165009)和广西科技重大专项(桂科 AA22117008、桂科 AA22117006)

作者简介: 李尚平(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化工程研究, E-mail: spli501@vip.sina.com

0 引言

甘蔗是国内重要的糖料作物,宿根蔗种植面积占甘蔗种植面积的 60% ~ 70%^[1-2],宿根性是甘蔗良种的重要性状之一^[3],但是随着宿根蔗的生长年限越来越长,受自然条件、机收损伤等因素的影响,导致宿根年限缩短^[4],宿根蔗出苗率逐年下降,断垄缺苗的现象会越来越严重,及时对断垄缺苗处进行补种,可有效提升蔗地单位面积产量^[5]。最简单有效的补种方法是直接使用预切断、浸药后的种茎进行补种,成本低且出苗率和成茎率较高^[6-7]。

通过补种机械进行补种,可以降低劳动强度、提高补种效率。广西壮族自治区农业科学院甘蔗研究所研制的种茎直接补种宿根蔗种植机采用转盘供种的方式实现宿根蔗单芽段补种^[8]。目前,国内外预切种式甘蔗种植机上的排种装置多为辊式、输送带式、链传动式排种机构^[9-12]。梁栋^[13]探讨的两种预切种式排种器机构分别是链槽式和排种辊式。排种器存在排种不均匀、耗种多、堵塞卡种等问题。国内学者提出弹性控流板与辊式排种器相结合的设计^[14]。辊式排种机构体积较小^[15],可以实现定量送种,排种较为均匀,符合甘蔗补种机的间歇精准工作和排种装置简单轻巧的要求。实现均匀精量排种对甘蔗补种机的工作质量具有十分重要的意义,精量排种系统多应用于玉米^[16-18]、油菜等种子体积小、形状要求严格的作物种植^[19-21]。甘蔗使用茎芽进行种植,蔗种体积大、形状不规则,堆积蔗种间的相互作用对排种过程影响大^[22],排种过程易发生堵塞、卡种等问题,目前的蔗种排种系统对工作条件的适应性较差,无法根据蔗种状态变化来调整控制参数。

笔者前期设计研制了一种安装在预切种式甘蔗补种机上的辊耙式双芽段蔗种排种器。但是该排种器的排种自动化程度也较低,不能根据种箱内蔗种的数量调整运行参数,其排种均匀性、精准性、稳定性不足,容易出现堵塞故障、工作效率较低。本文针对辊耙式双芽段蔗种排种器及控制系统存在的排种不均、易于堵塞的问题进行研究。

通过仿真与试验研究排种器机构的调整对排种性能影响,总结出不同蔗种数量工况下,不同参数对排种性能的影响关系,提出蔗种数量变化的工况下辊耙式双芽段蔗种排种器的优化控制方法,并设计一种参数自调节的电控双芽段甘蔗排种系统。该控制系统根据种箱内蔗种数量的变化,自动调整排种器的运行参数,降低蔗种数量变化对排种器性能均匀性及稳定性的影响,提高排种器排种过程的均匀

性、稳定性和效率,实现宿根蔗的高效与精准补种。

1 宿根蔗补种机与甘蔗排种系统结构设计仿真分析

1.1 结构组成及原理

预切种式宿根蔗补种机结构如图 1 所示,甘蔗排种系统安装于甘蔗补种机的前臂末端,补种机主要由机械臂、挖掘器、排种系统及控制系统、水箱、驾驶室等组成,排种系统安装于机械臂末端的安装台上。

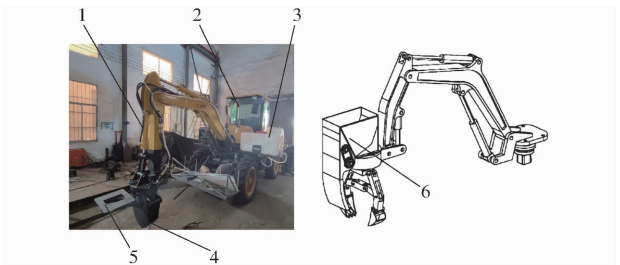


图 1 预切种式宿根蔗补种机结构示意图
Fig.1 Structure diagram of pre-cut ratoon cane reseedling machine

1. 机械臂 2. 驾驶室 3. 水箱 4. 挖掘器 5. 排种系统安装台
6. 排种系统

宿根蔗补种机工作过程:当挖掘器完成破垄挖坑作业后,排种系统将 2 ~ 3 段预切蔗段排入种沟里,再施加水肥、覆土等工序,由于排种系统单次排种数量的均匀性以及排种效率影响补种机的作业质量及效率,因此在以下的研究过程中,将排种均匀度及单次平均排种数量作为性能指标进行分析。

笔者前期研制的辊耙式排种系统结构如图 2 所示,主要由种箱、理蔗压板、辊耙组成。耙齿和耙辊依据蔗种直径分布情况进行设计,试验采用了 80 段蔗种,甘蔗品种为:中蔗 18 号,甘蔗种最大直径 $d_{\max}$ 为 36 mm,平均直径为 30 mm,平均长度 300 mm。为实现均匀有效排种,耙齿高度 L 比甘蔗最大直径大 10%,计算公式为

$$2r + 2L \leq 200 \text{ mm} \tag{1}$$

$$R = r + L/2 \tag{2}$$

$$L = 1.1 d_{\max} \tag{3}$$

$$2\bar{d} + \delta < \frac{2\pi R}{y} < 2d_{\max} + \delta \tag{4}$$

- 式中 r ——耙辊半径,mm
 R ——耙辊中心到耙齿中心长度,mm
 δ ——耙齿厚度,mm
 $\bar{d}$ ——平均直径,mm
 y ——耙齿排数

为适应不同的甘蔗直径,取耙齿高度 $L = 40 \text{ mm}$ 、厚度 $\delta = 5 \text{ mm}$,耙齿排数 $y = 8$,耙辊半径 $r =$

50 mm。

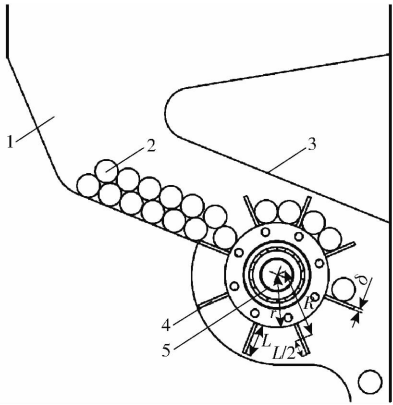


图2 排种系统结构示意图

Fig.2 Schematic of seeding system

1. 种箱 2. 蔗种 3. 理蔗压板 4. 耙齿 5. 辊耙

排种机构工作原理:种箱的截面采用双段曲面结构设计,以实现一次装满约 80 段蔗种,可满足一段时间内的连续补种作业。蔗种在自身重力的作用下沿下层曲面有序地向辊耙方向运动,理蔗压板可清理多余蔗种,同时调节排蔗通道出口,通过控制排种的压力与流量,可实现均匀排种。辊耙为间歇式工作状态,每次旋转 45°,在辊耙和理蔗压板的作用下,可将定量蔗种从排种口依次排种送出。

在前期试验中发现,该辊耙式排种机构工作过程中容易出现卡种和漏种的情况,为提高该机构的排种效率和合格率,需分析影响排种性能的主要因素及作用规律,本文使用 EDEM 软件对前期研制的排种机构进行离散元仿真分析,并根据所发现的主要问题,提出相应的解决方案。

1.2 排种系统结构改进

为了了解补种机排种系统的作用规律,分析影响均匀排种的主要因素,以进一步优化结构,实现排种的自动调整控制,采用 EDEM 软件对排种器排种过程进行离散元仿真分析^[23],开展虚拟仿真试验。

为便于仿真模拟及计算,去除与蔗种运动过程中接触无关的部件,对排种器进行实体建模后,以 .step 文件格式导入 EDEM 软件中,如图 3 所示。根据文献[23-24],将种箱、理蔗压板及耙辊材料设置为钢材,其泊松比为 0.3,剪切模量为 7×10^{10} Pa,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$;将耙齿材料设置为软质 PVC,其泊松比为 0.32,剪切模量为 5.68×10^6 Pa,密度为 $1\,282\text{ kg/m}^3$;辊耙角速度为 1 rad/s ^[24-25]。

根据试验用蔗种的几何参数:平均直径 30 mm,平均长度 300 mm,进行蔗种三维模型的建立,在 EDEM 软件中通过多球面组合的方式进行填充,模拟蔗种状态,如图 4 所示,根据文献[25],设置蔗种密度 $1\,100\text{ kg/m}^3$,剪切模量 1.082×10^7 Pa,泊松比

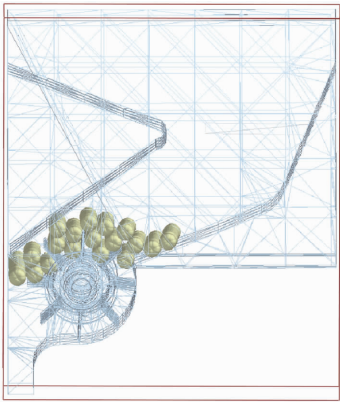


图3 排种器仿真结构图

Fig.3 Seeder simulation structure

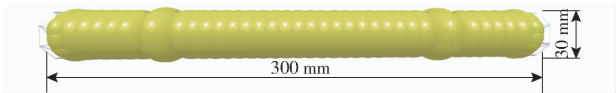


图4 蔗种仿真模型

Fig.4 Cane seed simulation model

0.33^[26]。种箱内蔗种模型总量为 20 段。仿真时间设置为 10 s。经过建模仿真后,得到辊耙转矩曲线如图 5 所示,辊耙转矩峰值为 $121.02\text{ N}\cdot\text{m}$ 。对工作过程的辊耙进行受力分析,简化排种机构结构如图 6 所示,并对图中蔗种进行简化受力分析^[27]。

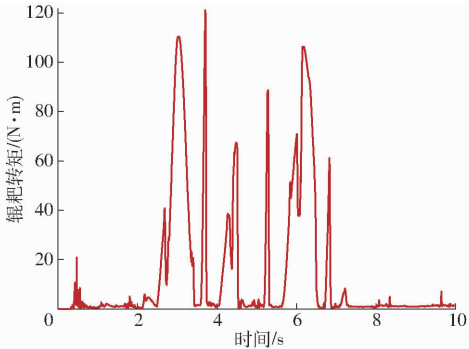


图5 辊耙转矩曲线

Fig.5 Roller rake torque curve

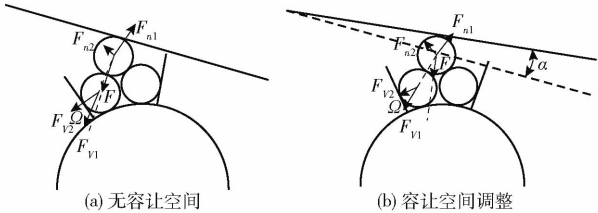


图6 排种机构排种过程简化分析

Fig.6 Simplified analysis of seed discharging process of seed discharging mechanism

由于理蔗压板固定于辊耙上部,没有一定的容让空间,当耙齿间的蔗种接触理蔗压板时,理蔗压板施加在蔗种上的力 F 会间接作用至辊耙上,且有

$$F_{v2} = F \cos \Omega \cos \theta \tag{5}$$

式中 F_{v2} ——蔗种作用在辊耙上的力 F_{v1} 作用在耙齿上的分力, N

F ——蔗种受理蔗压板的作用力, N
 Ω —— F_{v1} 与 F_{v2} 的夹角, ($^{\circ}$)
 θ —— F 与 F_{v1} 的夹角, ($^{\circ}$)

由于没有一定的容让空间, 角度 Ω 不变, 角度 θ 越小, 作用在辊耙上的作用力 F_{v2} 越大。为了减小辊耙旋转所需转矩, 可将理蔗压板设计成可活动, 活动范围角为 α , 当蔗种拥堵时给蔗种提供一定的容让空间, 来排除蔗种堵塞故障, 简化改进后排种机构结构如图 6 所示, 并对蔗种进行简化受力分析, 由于理蔗压板受力后有一定的活动角, 力 F 与力 F_{v1} 的夹角会增大, 根据式 (5) 可以得到作用在辊耙上的作用力 F_{v2} 和辊耙旋转所需的转矩将减小, 可解决排种过程堵塞的影响。

使用 EDEM 软件对调整理蔗压板增加容让空间后的排种过程进行离散元仿真分析, 将理蔗压板的活动角 α 设置为 0.1 rad , 施加在垂直于蔗压板末端向下的力为 20 N , 其余设置不变。仿真得到改进后辊耙转矩曲线如图 7 所示, 仿真结果表明, 改进后辊耙转矩峰值为 $21.6\text{ N}\cdot\text{m}$, 较改进前减小 82.15% 。

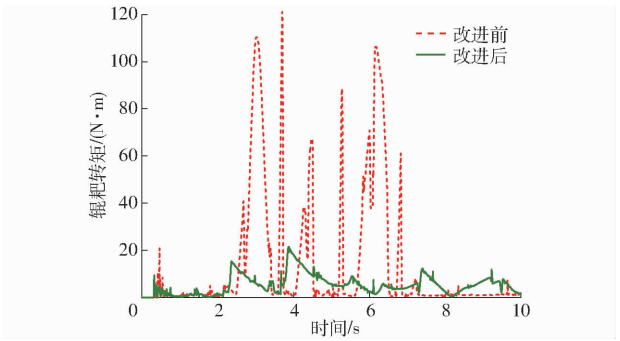


图 7 改进前后辊耙转矩曲线

Fig. 7 Roller rake torque curves before and after improvement

通过受力分析以及离散元仿真说明: 设置理蔗压板的动态容让空间, 可显著减小辊耙旋转时的阻力, 有效减少堵塞影响。

根据上述原理, 对笔者前期研制的排种装置改进如下: 理蔗压板采用铰接方式连接在辊耙上部, 同时在理蔗压板末端安装可调整的拉簧, 当辊耙一次性输送过多蔗种的情况下, 在一定的压力和扭矩作用下, 理蔗压板可以对耙齿上的多余蔗种进行清理。如理蔗压板可以围绕铰链进行角度 α 的动态容让空间的调整, 可以有效防止理蔗压板被输送来的过量蔗种挤压, 同时降低辊耙旋转时的阻力, 从而减少或避免排种堵塞。

改进后排种系统结构示意图如图 8 所示, 对图中典型位置的蔗种进行受力分析, 有

$$F_{Mi} = \sum F_{ni} + G \tag{6}$$

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2mS}{F_{Mi}}} \tag{7}$$

式中 F_{ni} ——蔗种受到作用力, N
 G ——蔗种自身重力, N
 F_{Mi} ——蔗种受到合力, N
 m ——蔗种质量, g
 S ——蔗种运动距离, mm
 Δt ——蔗种运动所需时间, s

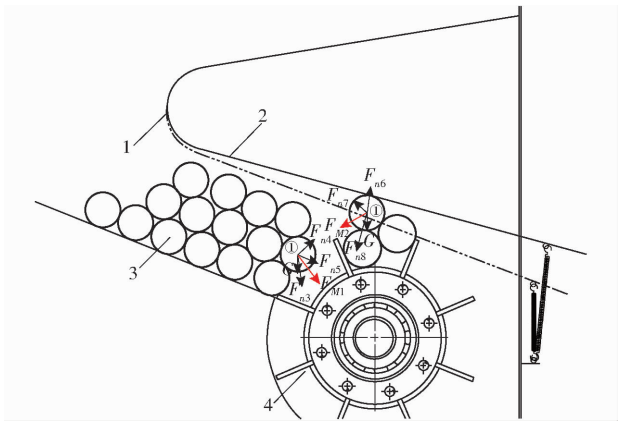


图 8 改进后排种系统结构示意图

Fig. 8 Schematic of structure of improved seed discharge system

1. 铰链 2. 理蔗压板 3. 蔗种 4. 辊耙

力 F_{M1} 为蔗种间作用力的合力, 作用在蔗种上的力 F_{M1} 使得蔗种向耙齿运动, 该作用力的大小和方向与种箱内的蔗种数量有关。当蔗种运动时间 Δt 一定时, 若辊耙角速度过大, 蔗种将不能顺利进入耙齿, 进而影响辊耙排种效率。从辊耙上清理多余蔗种的力 F_{M2} 是理蔗压板与蔗种间作用力的合力, 理蔗压板的角度和压力直接影响力 F_{M2} 的方向、大小以及蔗种清理效率。通过分析可以得出: 种箱内的蔗种数量、辊耙角速度、理蔗压板活动角度和理蔗压板压力是影响排种以及清种环节的主要因素, 在后续试验中将探究这些因素对排种系统性能的影响。

1.3 排种性能影响因素仿真分析

在其余设置不变的情况下, 分别改变 EDEM 仿真软件中的辊耙角速度、理蔗压板活动角度、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量的设置, 每个参数水平进行 10 次排种试验后记录排种均匀度和单次平均排种数量, 研究以上 4 种因素对排种机构排种性能的影响。试验结果如表 1 所示。

通过分析试验结果可以得到: 辊耙角速度和理蔗压板活动角的改变对单次平均排种数量的影响并不明显; 随着理蔗压板压力的增加, 单次平均排种数量呈现先下降然后轻微上升的趋势; 随着种箱内蔗种数量的增加, 单次平均排种数量呈现上升的趋

表 1 不同因素水平时排种性能
Tab.1 Seeding performance at different factor levels

参数	因素											
	耧耙角速度/(rad·s ⁻¹)			理蔗压板活动角/rad			理蔗压板压力/N			种箱内蔗种数量/段		
	1.0	1.5	2.0	0.15	0.20	0.25	10	20	30	40	60	80
平均排种数量/段	3.3	3.2	3.0	3.4	3.0	3.1	3.7	2.9	3.1	2.9	3.4	4.2
排种均匀度/段 ²	0.81	0.76	0.60	0.64	0.60	0.69	0.81	0.69	0.89	0.69	0.44	0.56

势。理蔗压板活动角对排种方差的影响并不明显；随着耧耙角速度的提高,排种方差呈现逐渐下降的趋势;理蔗压板压力和种箱内蔗种数量的增加,均使排种方差呈现先下降后上升的趋势。仿真试验初步说明了 4 种因素对排种机构排种性能的影响规律,在后续试验中将以耧耙角速度、理蔗压板活动角、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量作为试验因素进行系统试验。

2 排种机构主要影响因素试验优化

2.1 试验准备

试验在课题组自主设计的预切式甘蔗排种器试验平台上进行,如图 9 所示。该试验平台由种箱、可调整的理蔗压板、耧耙 3 部分组成,由步进电机带动耧耙以每次旋转 45°为一个工作周期间歇工作。

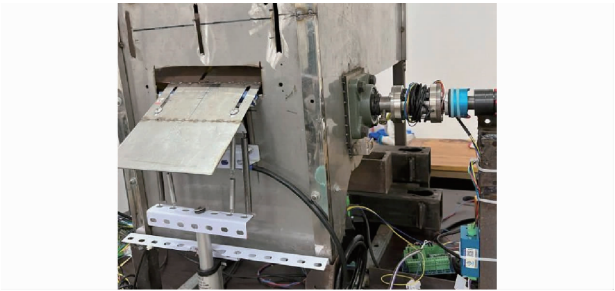


图 9 排种装置试验平台

理蔗压板可绕铰链活动角与水平面的夹角最小为 60°,最大为 65°,活动角 α 的变化范围为 0°~5°。理蔗压板的拉力通过两组 0.8·8·120 拉簧产生,通过调整拉簧下端固定点的位置来改变拉簧施加在理蔗压板末端拉力,理蔗压板结构受力简化如图 10 所示。

当理蔗压板活动角为 α 时,拉簧安装固定后长度为 h ;将理蔗压板活动角为 0°时所受拉簧拉力表示为 F_0 ,将拉簧作用在理蔗压板垂直方向上的力表示为 F_{0V} ;将理蔗压板在任意活动角 α 时所受拉簧拉力表示为 F_1 ,将拉簧此时作用在理蔗压板垂直方向上的力表示为 F_{1V} 。

当拉簧初始长度为 h 时,作用在理蔗压板垂直方向上的拉力为

$$F_0 = 0.18(h - 120) \tag{8}$$

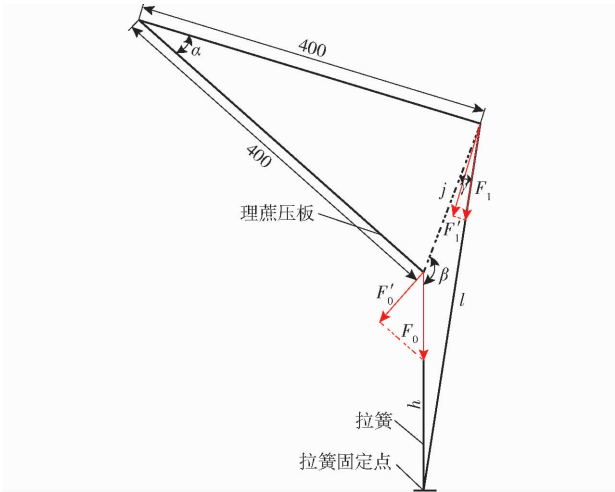


图 10 理蔗压板结构与受力简化图

Fig. 10 Simplified diagram of structure and forces of cane pressure plate

$$F_{0V} = F_0 \cos 30^\circ \tag{9}$$

当拉簧初始长度为 h 时,随理蔗压板活动角 α 变化,作用在理蔗压板垂直方向上的拉力为

$$F_1 = 0.18(l - 120) \tag{10}$$

$$F_{1V} = F_1 \cos \left(\gamma - \frac{\alpha}{2} \right) \tag{11}$$

$$j = 800 \sin \frac{\alpha}{2} \tag{12}$$

$$\beta = 150^\circ + \frac{\alpha}{2} \tag{13}$$

$$l = \sqrt{h^2 + j^2 - 2hj \cos \beta} \tag{14}$$

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{h}{l} \sin \beta \right) \tag{15}$$

式中 j ——理蔗压板活动前后的末端距离,mm
 β ——拉簧初始状态和力 j 方向之间的角度,(°)
 l ——拉簧伸长时的长度,mm
 γ ——伸长时拉簧与力 j 方向之间的角度,(°)

蔗种采用中蔗 18 号,采用预切种双芽蔗段,蔗种平均直径为 30 mm,平均长度为 300 mm,单段蔗种平均质量 210 g,如图 11 所示。

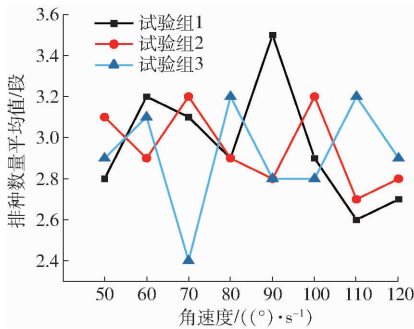
以排种均匀度、排种数量平均值为试验指标,分别通过单因素试验和 Box - Behnken 响应面正交试验,研究各主要参数对排种均匀度及排种数量平均值的影响。每个参数安排 3 组重复试验,以排种 10 次为一组,试验后通过方差分析,分析不同影响因素



图 11 试验蔗种

Fig. 11 Experimental cane species

对排种性能的影响。



2.2 单因素试验

2.2.1 耢耙角速度

以耢耙角速度为变量,以排种均匀度、排种数量平均值为试验指标,进行单因素试验,研究耢耙角速度对排种性能的影响。耢耙角速度取 50、60、70、80、90、100、110、120($^{\circ}$)/s;种箱内蔗种数量取 60 段;理蔗压板活动角 α 为 5° ;将理蔗压板压力调整为 5 N。试验结果如图 12 所示,耢耙角速度变化对排种数量平均值整体趋势影响较小;而排种

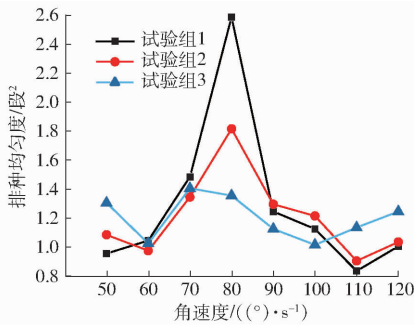


图 12 耢耙角速度对排种性能影响的试验曲线

Fig. 12 Experimental curves of effect of roller rake angular speed on seeding performance

均匀度随着耢耙角速度增加,呈先上升后下降的趋势。

2.2.2 蔗种数量

以种箱内蔗种数量为变量,以排种均匀度、排种数量平均值为试验指标,研究种箱内蔗种数量对排

种性能的影响。种箱内蔗种数量取 10、20、30、40、50、60、70、80 段;耢耙角速度固定为 110($^{\circ}$)/s;理蔗压板活动角 α 为 5° ;将理蔗压板的压力调整为 5 N,试验结果如图 13 所示,排种数量平均值和排种均匀度均随着蔗种数量的增多有明显升高的趋势。

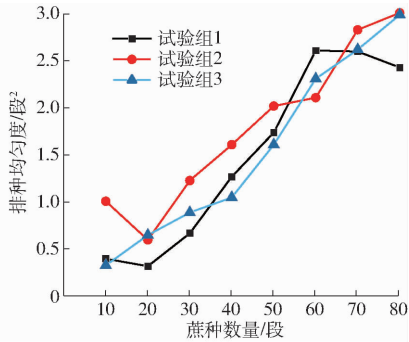
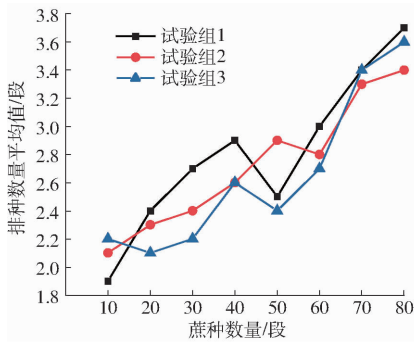


图 13 蔗种数量对排种性能影响的试验曲线

Fig. 13 Experimental curves of effect of sugarcane seed quantity on seeding performance

2.2.3 理蔗压板活动角

以理蔗压板活动角为变量,以排种均匀度、排种数量平均值为试验指标,研究理蔗压板活动角对排种性能的影响。排种器通过安装限位块来限制理蔗压板的活动角,并设置理蔗压板角度 α_1 、 α_2 ,分别表示理蔗压板开启角为 3° 、 5° ,但理蔗压板并不能自由活动。理蔗压板活动角 α 分别取 0° 、 1° 、 2° 、 3° 、 α_1 、 4° 、 5° 、 α_2 。种箱内蔗种数量取 60 段;耢耙角速度固定为 110($^{\circ}$)/s。为了保证试验变量单一,避免理蔗压板活动角不同而导致的拉簧拉力不同的情况,在理蔗压板活动角度的单因素试验中不采用拉

簧为理蔗压板提供拉力,改在理蔗压板末端加装配重块,配重块质量为 1 kg。试验结果如图 14 所示,排种数量平均值和排种均匀度与理蔗压板活动角的关系并不明显。

2.2.4 理蔗压板压力

以理蔗压板压力为变量,以排种均匀度、排种数量平均值为试验指标,研究理蔗压板压力对排种性能的影响。通过改变两组拉簧固定点的位置,来调整理蔗压板压力,理蔗压板压力取 5、6、7、8、9、10、11、12 N;耢耙角速度固定为 110($^{\circ}$)/s;种箱内蔗种数量取 60 段;理蔗压板活动角 α 为 5° 。试验结果

如图 15 所示,排种数量平均值随着理蔗压板压力的增加有逐渐减小的趋势,排种均匀度随着理蔗压板压力的增加有逐渐增大的趋势。

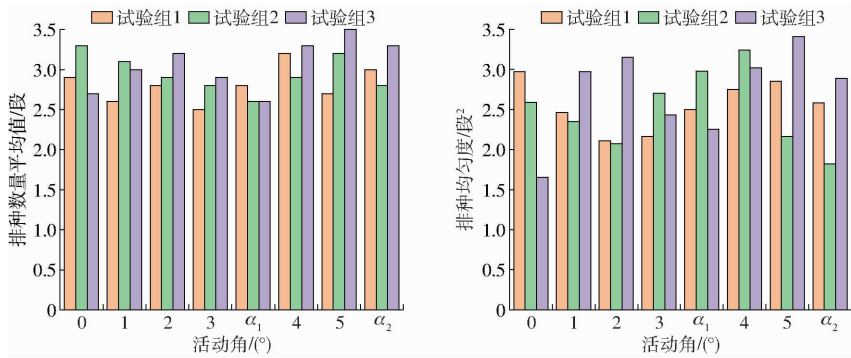


图 14 理蔗压板活动角对排种性能影响的试验结果

Fig. 14 Experimental results of effect of sugarcane management plate activity angle on seeding performance

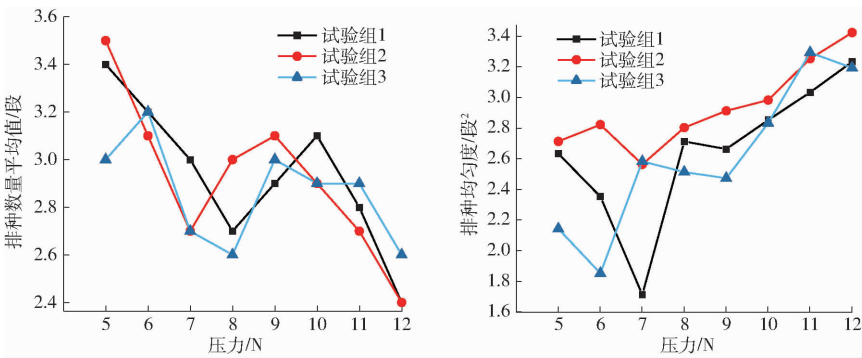


图 15 理蔗压板压力对排种性能影响的试验曲线

Fig. 15 Experimental curves of effect of cane management plate pressure on seeding performance

表 2 单因素试验方差分析
Tab.2 One-way test ANOVA

因素	指标	范围	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
耧耙角速度	排种数量平均值	组间	0.233	7	0.033	1.111	0.403
		组内	0.480	16	0.030		
	排种均匀度	组间	1.251	7	0.179	7.243	0.001 **
		组内	0.395	16	0.025		
理蔗压板活动角	排种数量平均值	组间	0.725	7	0.104	1.738	0.170
		组内	0.953	16	0.060		
	排种均匀度	组间	1.738	7	0.248	1.297	0.313
		组内	3.062	16	0.191		
理蔗压板压力	排种数量平均值	组间	1.412	7	0.202	8.345	<0.001 **
		组内	0.387	16	0.024		
	排种均匀度	组间	2.856	7	0.408	4.735	0.005 **
		组内	1.378	16	0.086		
种箱内蔗种数量	排种数量平均值	组间	5.630	7	0.804	24.745	<0.001 **
		组内	0.520	16	0.033		
	排种均匀度	组间	18.998	7	2.714	35.382	<0.001 **
		组内	1.227	16	0.077		

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$), 下同。

试验统计结果表明:种箱内蔗种数量、理蔗压板压力对排种数量平均值具有显著性影响;耧耙角速度、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量对排种均匀度具

2.2.5 单因素试验方差分析

对单因素试验数据进行方差分析,结果如表 2 所示。

有显著性影响;压板活动角对排种均匀度以及排种数量平均值均没有显著影响,后续试验将不考虑将其作为 Box - Behnken 响应面正交试验的因素。

2.3 Box – Behnken 响应面正交试验

通过单因素试验数据方差分析,确定耢耙角速度、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量为正交试验的试验因素,各因素取 3 水平,如表 3 所示。选取排种数量平均值、排种均匀度作为试验指标,每组排种试验进行 10 次重复性试验。

表 3 正交试验因素水平

Tab.3 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	耢耙角速度 A/ ($(^{\circ})\cdot s^{-1}$)	种箱内蔗种 数量 B/段	理蔗压板 压力 C/N
1	100	10	5.0
2	110	45	8.5
3	120	80	12.0

采用 Box – Behnken 响应面分析法进行三因素三水平正交试验,完成试验并计算排种数量平均值与排种均匀度。试验结果如表 4 所示。

表 4 响应面正交试验结果

Tab.4 Response surface orthogonal test results

编号	A/ ($(^{\circ})\cdot s^{-1}$)	B/ 段	C/ N	排种数量 平均值/段	排种均匀 度/段 ²
1	110	45	8.5	2.8	1.98
2	110	45	8.5	2.6	2.06
3	110	45	8.5	2.6	2.31
4	100	45	12.0	2.2	4.18
5	120	80	8.5	3.3	2.8
6	110	45	8.5	2.4	1.84
7	120	45	5.0	3.4	2.43
8	100	45	5.0	3.2	3.2
9	110	80	12.0	3.2	4.01
10	110	10	12.0	1.8	4.23
11	110	10	5.0	2.3	2.13
12	120	45	12.0	2.3	2.82
13	100	80	8.5	3.6	5.36
14	110	45	8.5	2.6	2.2
15	110	80	5.0	3.8	4.31
16	100	10	8.5	2.5	3.43
17	120	10	8.5	2.1	2.93

分别对排种数量平均值和排种均匀度进行方差统计分析,结果如表 5 所示:种箱内蔗种数量、理蔗压板压力对排种数量平均值具有显著影响;耢耙角速度、种箱内蔗种数量、理蔗压板压力及其平方项以及种箱内蔗种数量与耢耙角速度、理蔗压板压力的交互作用对排种均匀度均有显著影响。

正交试验结果表明,在不同试验因素的交互作用下,排种数量平均值变化较小,如图 16a 所示,排种在 2~4 段范围内,整体满足实际补种工作需求;排种均匀度在各因素的交互作用下波动较大,如图 16b 所示。当理蔗压板压力和种箱内蔗种数量一

表 5 响应面正交试验方差分析

Tab.5 Response surface orthogonal experimental analysis of variance

参数	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
排种数量平均值	模型	4.68	3	1.56	36.06	<0.000 1 **
	A	0.02	1	0.02	0.462 3	0.508 5
	B	3.38	1	3.38	78.14	<0.000 1 **
	C	1.28	1	1.28	29.59	0.000 1 **
	残差	0.562 4	13	0.043 3		
	失拟	0.482 4	9	0.053 6	2.68	0.177 8
排种均匀度	误差	0.08	4	0.02		
	总和	5.24	16			
	模型	16.62	9	1.85	47.94	<0.000 1 **
	A	3.37	1	3.37	87.39	<0.000 1 **
	B	1.77	1	1.77	45.87	0.000 3 **
	C	1.26	1	1.26	32.6	0.000 7 **
	AB	1.06	1	1.06	27.53	0.001 2 **
	AC	0.087	1	0.087	2.26	0.176 6
	BC	1.44	1	1.44	37.37	0.000 5 **
	A ²	1.14	1	1.14	29.52	0.001 **
	B ²	4.49	1	4.49	116.44	<0.000 1 **
	C ²	1.32	1	1.32	34.24	0.000 6 **
	残差	0.269 7	7	0.038 5		
	失拟	0.134 4	3	0.044 8	1.32	0.383 4
	误差	0.135 3	4	0.033 8		
	总和	16.89	16			

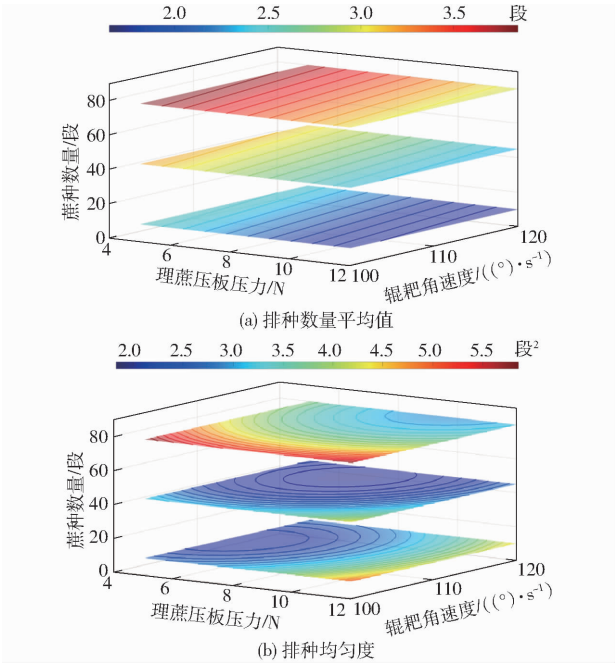


图 16 响应面等高线图

Fig.16 Response surface contour plots

定时,排种均匀度随着耢耙角速度的增加呈现减小趋势;当耢耙角速度和种箱内蔗种数量一定时,排种均匀度随着理蔗压板压力的增加呈现先减小后增大的趋势;当耢耙角速度和理蔗压板压力一定时,排种均匀度随着种箱内蔗种数量的增加呈现先减小后增

大的趋势。

2.4 自调节控制原理及控制参数求解

自调节控制参数的原理:由于在实际补种作业中,种箱内的蔗种数量并不能保持恒定,往往是一次性装入足量蔗种后进行补种作业,直至蔗种耗尽再重复将种箱内的蔗种填满。在此过程中,种箱内的蔗种数量始终处于动态变化。由于种箱内蔗种数量与其他因素的交互作用对排种均匀度的影响显著,因此,以辊耙角速度以及理蔗压板所受拉力为需要自动调节的控制参数,根据种箱内蔗种数量的变化,实时调整辊耙角速度及理蔗压板所受拉力,使排种均匀度保持在较稳定的水平,并保持排种均匀度始终为局部最小值。

利用 Design-Expert 软件对以上试验结果进行拟合,得到排种均匀度 V 响应面回归方程

$$V = 62.44775 - 1.10629A + 0.14108B + 0.020398C - 0.001471AB - 0.004214AC - 0.004898BC + 0.005197A^2 + 0.000843B^2 + 0.045694C^2 \quad (16)$$

求解排种过程中,当种箱内蔗种数量不断变化时,对应于最佳排种效果时辊耙角速度和施加给理蔗压板拉力 C ,求解得到的局部最优匹配关系。使用 Matlab 软件求解,并拟合出在种箱内蔗种数量变化的过程中,针对辊耙角速度、理蔗压板压力的局部最优组合的拟合曲线,如图 17 所示。

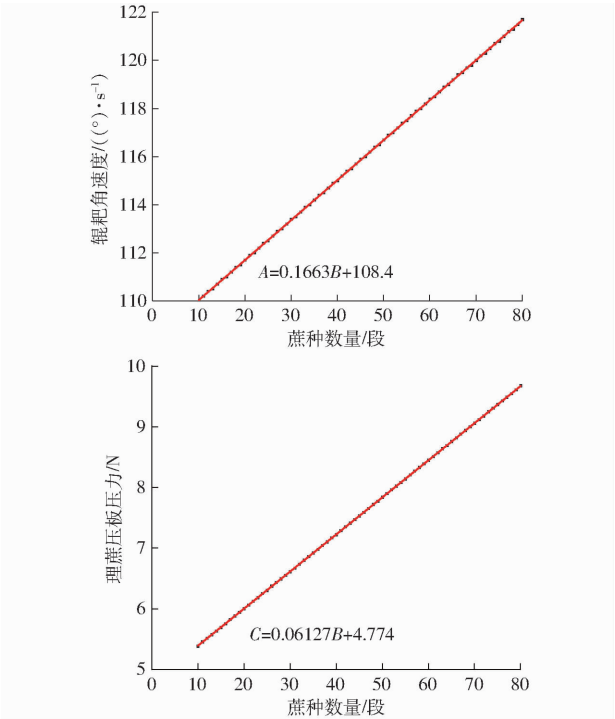


图 17 最优匹配关系曲线

Fig. 17 Optimal matching relationship curve

得到最佳排种效果时种箱内蔗种数量和辊耙角速度、理蔗压板压力的关系,拟合方程为

$$A = 0.1663B + 108.4 \quad (17)$$

$$C = 0.06127B + 4.774 \quad (18)$$

根据蔗种数量和辊耙角速度以及理蔗压板压力匹配关系,可以确定排种机构电控系统的控制逻辑与控制参数,以达到最优排种效果。

3 自调节控制系统设计

排种器控制系统由检测系统和执行系统两部分组成,如图 18 所示。检测系统的控制模块通过读取功能按键状态和各传感器的测量值来测定系统当前工作情况,并根据系统当前工作情况来设定并调整排种器的运行参数^[28-29],如:辊耙角速度、理蔗压板压力、故障停机,检测系统控制模块将调整后的参数值通过数据总线分别发送给执行系统的各控制模块。

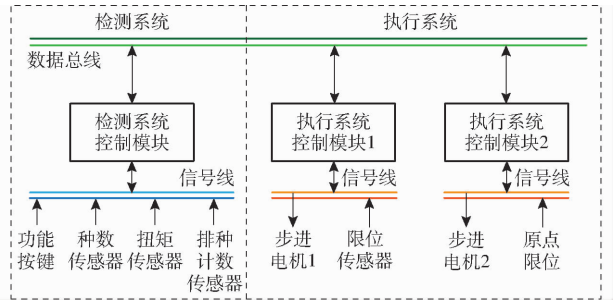


图 18 控制系统组成示意图

Fig. 18 Schematic of control system

执行系统的两组控制模块通过数据总线接收并执行检测系统发送来的指令,通过控制执行部件来完成控制参数的调整。

3.1 检测系统

种箱内蔗种数量检测采用 P8864 - SMD - B15 型 3D TOF (Time-of-Flight) 微型传感器,该传感器使用激光点阵进行距离测量,视野角 32° ,距离分辨率 10 mm。传感器安装在种箱中心位置,距种箱上表面 240 mm,蔗种数量与传感器测量数据的标定如图 19 所示,在种箱内蔗种数量的不同阶段,分别采集 3 次传感器返回数据并取其平均值。

利用 Matlab 软件拟合,得到种箱内蔗种数量和 P8864 传感器测量值的关系方程为

$$x = 105.4e^{-[(d - 560.9)/251]^2} \quad (19)$$

式中 d ——传感器测量值,mm

为了监测辊耙工作负荷的变化,在辊耙与辊耙电机之间安装扭矩传感器,传感器测量范围为 $0 \sim 100 \text{ N} \cdot \text{m}$,扭矩传感器搭配模拟量变送器将扭矩信号转换为标准电压 $-5 \sim 5 \text{ V}$ 信号进行输出,即 $0.05 \text{ V}/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。采用 ADS1115 模数转换模块来读取变送器输出的电压信号,转换精度为 16 位,采样

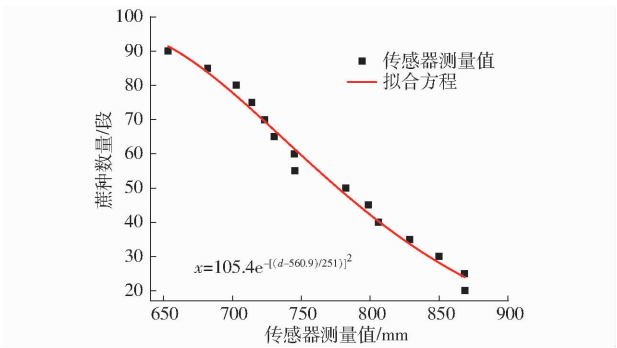


图 19 蔗种数量与传感器测量数据标定拟合曲线

Fig. 19 Calibration fitting curve of sugarcane seed quantity and sensor measurement data

速率最高 860 B/s。

在排种器排种口处安装一组高速激光漫反射光电开关传感器,用于检测排种器排出的蔗种数量。

检测系统的控制模块采用 ESP32 - D0WD - V3 单片机,其具有 34 个 GPIO 引脚,最大时钟频率 240 MHz。为了避免信号在采集过程中出现延迟或者不同步的现象,提高数据采集的准确性和实时性,核心控制模块采用定时器中断触发方式采集种箱内蔗种数量和扭矩信息;使用外部中断触发的方式检测排种数量。

3.2 执行系统

辊耙电机选用 86BYG250D 型步进电机,加装 20:1 行星减速器驱动辊耙转动,步进电机驱动器采用 4 倍细分。由于排种系统待机时,辊耙上的耙齿需要保持在特定位置,所以在耙齿外侧安装漫反射式光电开关来确定辊耙耙齿的零点位置。

由于步进电机搭配了较高减速比的行星减速器,且处于间歇、带载启停的工作模式,导致步进电机在启停速度突变过大时容易出现启动困难、启动抖动、过冲等问题,如图 20a 所示,最高角速度为 50(°)/s。本文采用步进电机 S 形加减速算法来避免上述问题^[30],加速过程中步进电机随时间变化速度逐渐增大,减速过程中步进电机接近目标位置时速度逐渐减小,以确保辊耙运动的快速与准确。S 形加减速算法为

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega' = \omega_0' + \frac{1}{2} \left[(\omega_1' - \omega_0') \sin \left(\frac{\pi}{t_1} t - \frac{\pi}{2} \right) + \omega_1' - \omega_0' \right] \\ \quad (0 < t \leq t_1) \\ \omega' = \omega_1' - \frac{1}{2} \left[(\omega_1' - \omega_0') \sin \left(\frac{\pi}{n_1} n - \frac{\pi}{2} \right) + \omega_1' - \omega_0' \right] \\ \quad (0 < n \leq n_1) \\ T = \frac{2\pi}{iP\omega'} \quad (0 < \omega') \end{array} \right. \quad (20)$$

式中 ω' ——电机角速度,(°)/s
 ω_1' ——加速完成角速度,(°)/s

ω_0' ——加速前初始角速度,(°)/s
 t_1 ——加速周期,s
 t ——当前时间,s
 n_1 ——减速所需脉冲步数
 n ——当前已发送脉冲步数
 T ——脉冲周期,s
 i ——行星减速器减速比
 P ——步进电机驱动器细分倍数

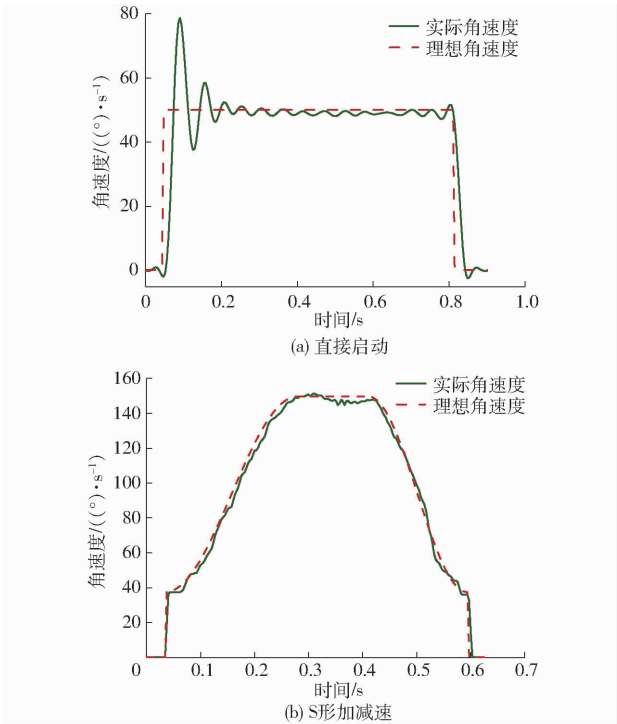


图 20 辊耙速度曲线

Fig. 20 Roller rake speed curves

按照加减速曲线调整步进电机脉冲周期,从而实现 S 形加减速辊耙速度如图 20b 所示,步进电机启动和停止时的失步及过冲现象不明显,最高角速度可达到 150(°)/s,较直接启动时的最高角速度提高 3 倍。

理蔗压板上拉簧调整机构设计如图 21 所示,将与理蔗压板连接的拉簧末端固定在步进电机推杆顶端。通过控制推杆的位置,来调整拉簧施加在理蔗压板上的拉力,推杆位置由种箱内蔗种数量决定。

选取的两组 0.8·8·120 规格的拉簧,使用 NK - 100 型指针式推拉力计配合测试台对拉簧的弹力系数进行测定,测定结果的拉力数据拟合如图 22 所示,测量计算得单组拉簧弹力系数约为 0.09 N/mm。

调整步进电机推杆安装位置,使推杆顶点处于原点时,两组拉簧拉力为 5 N。通过控制步进电机推杆顶点与原点的距离,即可改变拉力 f ,约为 0.18 N/mm。排种均匀度在最佳水平下的种箱蔗种

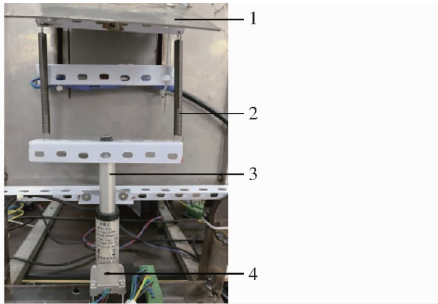


图 21 拉簧调整机构

Fig. 21 Tension spring adjustment mechanism

1. 蔗压板 2. 拉簧 3. 推杆 4. 步进电机

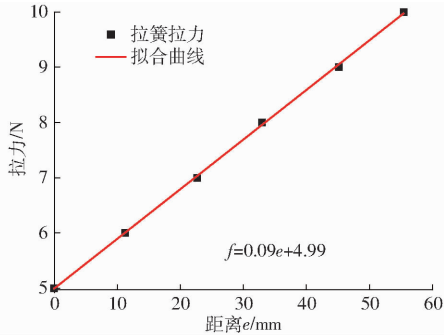


图 22 拉簧拉力线性拟合曲线

Fig. 22 Tension spring tension linear fitting equation

数量与电动推杆顶点位置的关系式为

$$e = 0.34x - 1.26 \tag{21}$$

式中 e ——推杆顶点与原点的距离, mm

设计控制模块时,为了避免单片机内部硬件定时器的相互冲突造成程序运行冲突,执行系统的核心控制模块采用 2 组 ESP32 - D0WD - V3 型芯片的

监测系统

单片机,2 组单片机分别控制辊耙电机和调整蔗压板所受拉力的推杆电机。

3.3 电路

控制模块均采用 ESP - WROOM - 32 型单片机,该系统控制模块与 ADS1115 模块和其它控制模块之间均采用 I²C 总线进行数据和控制指令的传输;P8864 TOF 传感器与单片机通过 UART 串口进行通信。

为了贴近实际作业环境,系统采用 24 V 100 A·h 铅酸蓄电池作为主电源,分别向辊耙步进驱动器、推杆步进驱动器、扭矩变送器、漫反射光电开关、光耦隔离器供电。使用 24 V 转 3.3 V、2 A 直流降压模块向核心控制模块 ESP32 单片机、P8864 TOF 传感器以及 ADS1115 模块供电。电路图如图 23 所示。

3.4 控制系统整体设计

功能区分为初始化、手动控制、自动控制和故障检测 4 部分,控制流程图如图 24 所示。检测系统以及执行机构初始化后,检测系统检测种箱内蔗种数量,若蔗种数量不足则向农机操作员报警,获得蔗种数量后,根据蔗种数量与步进电机运行速度、步进推杆运动行程的关系方程来设定步进电机运行速度和步进推杆方向与行程调整完成后等待运行信号。当操作员发出运行指令后,步进电机按照预设速度运行,到位后停止。若步进电机运行过程中出现连续 3 次采集到扭矩超限的情况,则立即将步进电机停机并发出扭矩超限报警,超限扭矩设定为正常工作扭矩(正常工作扭矩在 15 N·m 以内)的 1.5 倍。

辊耙电机执行机构

拉簧调整电机执行机构

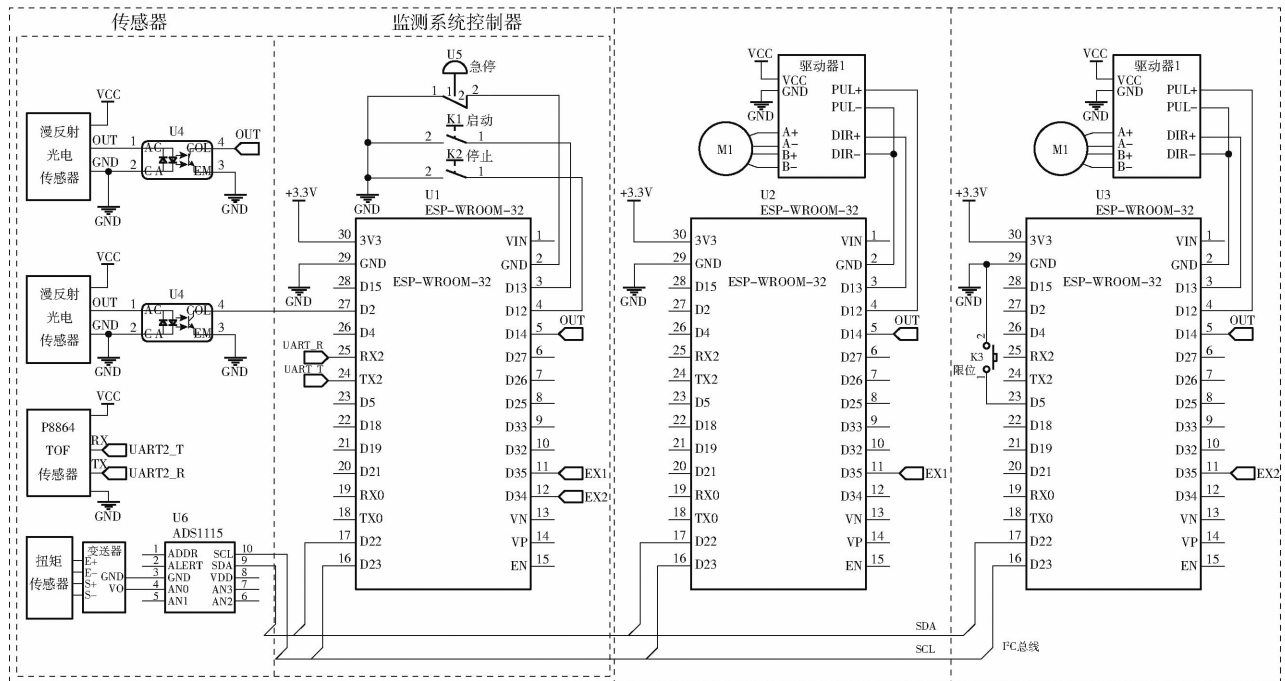


图 23 电路图

Fig. 23 Circuit diagram

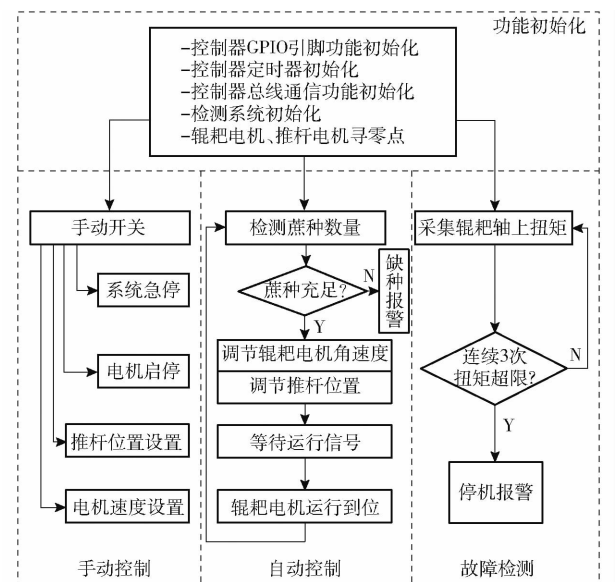


图 24 控制流程图
Fig. 24 Control flowchart

4 参数自调节控制试验

4.1 试验条件与方法

采用“中蔗 18”双芽段蔗种进行排种试验,种箱蔗种储量为 90 段,试验台如图 25 所示,采用摄像机拍摄并记录蔗种排出过程,观察蔗种下落姿态,如图 26 所示。将排种器整个工作周期的排种效果作为评价指标,排种指标为合格率(单次排种在 2 段或 3 段即为合格)以及排种均匀度。通过高速漫反射光电传感器采集排种数量,增量式编码器采集辊耙角速度,激光测距传感器测量步进推杆的运动行程,扭矩传感器采集辊耙的轴上扭矩。

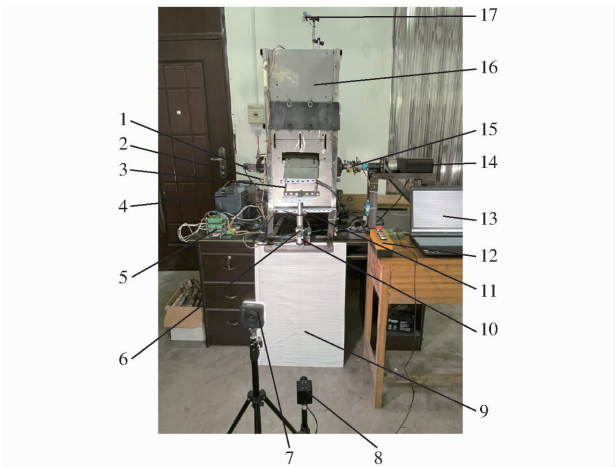


图 25 试验台
Fig. 25 Test environment

1. 增量式编码器 2. 光电开关 3. 拉簧 4. 蓄电池 5. 控制器
6. 激光距离传感器 7. 补光灯 8. 摄像机 9. 背景板 10. 步进推杆
11. 高速光电开关传感器 12. 按钮盒 13. 个人计算机
14. 步进电机 15. 扭矩传感器 16. 排种器 17. TOF 传感器

试验因素安排如表 6 所示,3 组试验蔗种数量



图 26 蔗种下落姿态
Fig. 26 Cane seed falling stance

均为 90 段,对比参数自调节试验组和故障自检试验组的效果,以上两种试验组的辊耙角速度和理蔗压板拉簧拉力均为系统自动调整。由于排种过程中,种箱内的蔗种数量会逐渐减小,对照试验组为了降低蔗种数量的变化对排种性能的影响,根据前期试验结果将辊耙角速度和理蔗压板拉簧拉力设置为中等蔗种数量对应的最佳参数。当种箱内蔗种剩余 45 段时,将蔗种数量代入式(17)、(18)后可得辊耙角速度为 $115.8(^{\circ})/s$,拉簧拉力为 7.53 N 。参数自调节试验组用于验证排种系统在变工况条件下的排种性能,在故障自检试验组中随机添加蔗种堵塞点,用于验证排种系统在遇卡种故障时的响应时间。

表 6 试验安排
Tab. 6 Trial arrangement

参数	参数自调节 试验组	故障自检 试验组	对照组
蔗种数量/段	90	90	90
辊耙角速度/ $((^{\circ})\cdot s^{-1})$	(自调节)	(自调节)	115.8
理蔗压板压力/N	(自调节)	(自调节)	7.53

4.2 参数自调节试验过程与结果分析

排种系统的工作过程如下:系统通过检测种箱内的蔗种数量,并根据蔗种数量与辊耙角速度和步进推杆位置的最优关系式(17)、(21),计算并调节辊耙电机角速度,使其保持在最佳工作角速度;计算并调节步进推杆的位置,使施加在理蔗压板上的力处于最佳值。排种系统蔗种数量读取和参数调节过程如图 27 所示,排种系统通过上述控制方法,可以在排种器种箱内蔗种数量不断变化的工作情况下始终保持自身的排种效果处于最优水平。

蔗种数量传感器的最大检测误差为 10.9%,当传感器返回值小于等于 20 时,即判定为缺种;辊耙角速度最大超调量为 2.08%,最大调节时间为 0.26 s;推杆运动位置的最大超调量为 14.26%,最大调节时间为 1.16 s。

参数自调节控制试验结果如图 28 所示,未使用

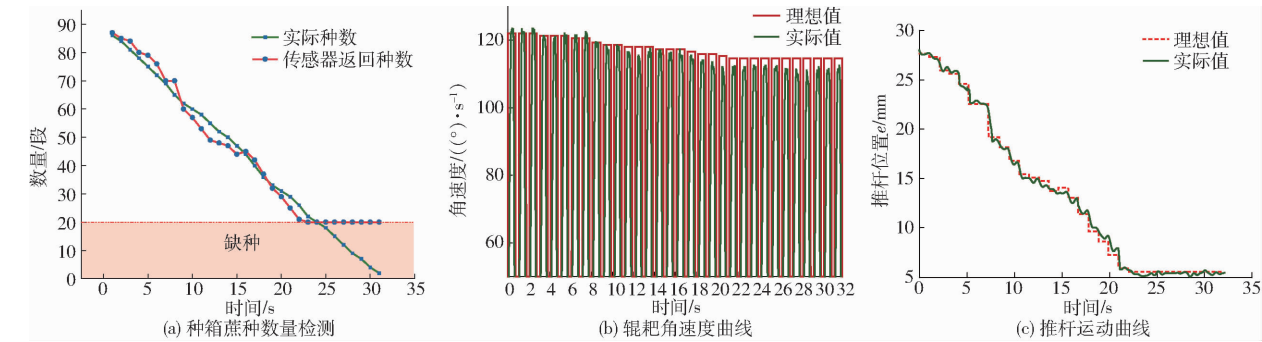


图 27 蔗种数量读取和参数调节过程曲线

Fig. 27 Cane seed quantity reading and parameter adjustment process curves

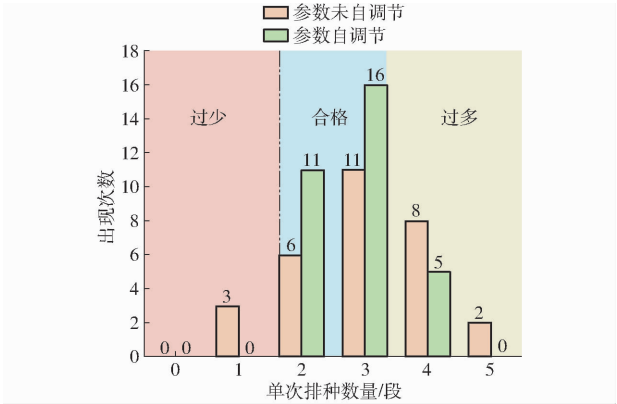


图 28 参数自调节控制试验结果

Fig. 28 Parameter self-adjusting control test results

自调节时,排种数量平均值为 3.0 段,合格率为 85.56%,排种均匀度为 1.13 段²。使用参数自调节时,排种数量平均值为 2.81 段,合格率为 94.44% (与同类型不具备参数自调节控制的排种系统相比,提高 8.88 个百分点),排种均匀度为 0.46 段²。

4.3 故障自检试验与结果分析

检测系统的核心控制模块以频率 50 Hz 读取耢耙轴上的扭矩信息并加以判断,当连续检测到 3 次扭矩超过 22.5 N·m 时,判定为扭矩超限,并立即做出响应(在首次采集到超限的扭矩信号至做出响应动作的时间为 60 ~ 80 ms),向耢耙步进电机控制器的外部中断触发引脚发送控制信号,即使耢耙步进电机停止,避免机构损坏。

排种器正常工作时耢耙上的扭矩曲线和控制器响应如图 29 所示,耢耙间歇地转动使排种器内的蔗种被有序排出,在这个过程中耢耙的轴上扭矩均处在正常值以内,未达到控制器设置的扭矩超限阈值,控制器未响应。

排种器工作过程中出现蔗种堵塞时,耢耙的轴上扭矩会随着蔗种堵塞程度的增加而增加,当排种器中蔗种排出不畅或蔗种堆积堵塞造成排种器故障时,排种器耢耙上的扭矩曲线和控制器响应如图 30 所示,采集到的耢耙轴上扭矩连续 3 次超过了控制器所设置的阈值,控制器响应并使耢耙电机停

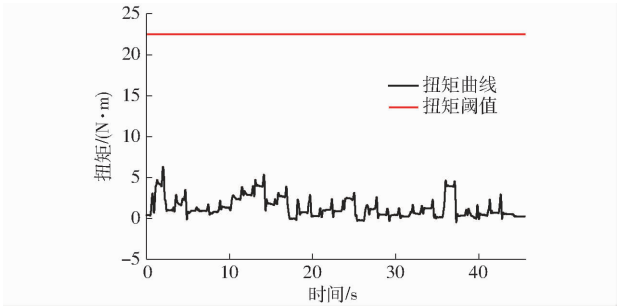


图 29 正常状态耢耙轴上扭矩变化曲线

Fig. 29 Torque curve on roller rake shaft in normal state

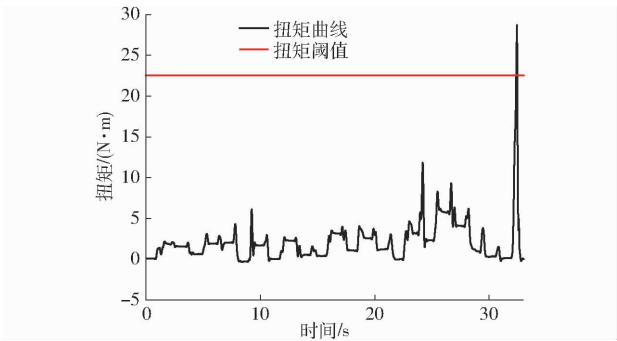


图 30 堵塞时耢耙轴上扭矩变化曲线

Fig. 30 Torque curve on roller rake shaft when clogged

止,避免造成排种机构损坏。

5 结论

(1)通过搭建的排种器测得,耢耙角速度、理蔗压板压力、种箱内蔗种数量对排种均匀度均有显著影响,试验因素对排种均匀度影响由大到小为耢耙角速度、种箱内蔗种数量、理蔗压板压力。

(2)针对现有预切式甘蔗排种系统存在的排种稳定性差、精度低的问题,系统分析了影响排种系统排种性能的主要因素,明确了系统的控制参数及控制规律,改进并设计了一款可进行参数自调节控制的预切式甘蔗排种系统。通过仿真与试验,建立了该排种系统的参数调节模型,并设计了配套的电控系统,实现了工况信息采集、工作参数自动调节以及故障自检功能,故障自检响应时间

小于 80 ms。

(3) 试验结果表明, 该系统进行排种作业时, 排种合格率为 94.44%, 排种均匀度为 0.46 段², 与同类型不具备参数自调节控制的排种系统相比, 排种合格率提高 8.88 个百分点, 排种均匀度由 1.13 段²优化至 0.46 段²。

参 考 文 献

[1] 杨荣仲, 周会, 梁强, 等. 甘蔗家系宿根性分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 1932 – 1940.
YANG Rongzhong, ZHOU Hui, LIANG Qiang, et al. Analysis of ratooning ability for sugarcane families[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(7): 1932 – 1940. (in Chinese)

[2] 吴建明, 陈荣发, 丘立杭, 等. 不同补种方法对宿根蔗的效果研究[J]. 甘蔗糖业, 2022, 51(4): 7 – 12.
WU Jianming, CHEN Rongfa, QIU Lihang, et al. Study on the effetc of different reseeding methods on sugarcane [J]. Sugarcane and Canesugar, 2022, 51(4): 7 – 12. (in Chinese)

[3] 苏广达, 吴伯焜. 宿根甘蔗生物学特性的综述[J]. 甘蔗糖业, 1980, 9(12): 10 – 13, 18.

[4] 翁卓, 黄寒. 中国制糖产业竞争力对比与政策建议——基于对巴西、印度、泰国考察的比较[J]. 甘蔗糖业, 2015, 44(4): 65 – 72.
WENG Zhuo, HUANG Han. Comparative analysis on China's sugar industry competitiveness: based on the comparison of Brazil, India and Thailand sugar industry[J]. Sugarcane and Canesugar, 2015, 44(4): 65 – 72. (in Chinese)

[5] 徐林, 黄海荣, 游建华, 等. 单芽段种茎机械直接补种作业对宿根蔗的影响[J]. 广西糖业, 2022, 42(2): 3 – 9.
XU Lin, HUANG Hairong, YOU Jianhua, et al. Effect of mechanical replanting on ratoon cane with single bud section[J]. Guangxi Sugar Industry, 2022, 42(2): 3 – 9. (in Chinese)

[6] 游建华, 梁阔, 樊保宁, 等. 种茎直接补种对甘蔗宿根性的影响——以 2017 年广西融水苗族自治县试验为例[J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 1790 – 1796.
YOU Jianhua, LIANG Tian, FAN Baoning, et al. Effects of direct replanting seed caneon ratoon sugarcane, a case study in Rongshui Miao Autonomous County, Guangxi in 2017[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(9): 1790 – 1796. (in Chinese)

[7] 黄日宏, 陈以参, 卢川, 等. 桂辐 98 – 296 单芽与双芽段直接补种对桂糖 46 号宿根蔗的影响及效益分析[J]. 甘蔗糖业, 2022, 51(6): 23 – 26.
HUANG Rihong, CHEN Yishen, LU Chuan, et al. The effect and benefit analysis of directly replanting seed cane in Guitang46 ratoon crop with Guifu98 – 296 single bud and double buds segments[J]. Sugarcane and Canesugar, 2022, 51(6): 23 – 26. (in Chinese)

[8] 广西壮族自治区农业科学院甘蔗研究所. 种茎直接补种宿根蔗种植机: 201921731141.5[P]. 2020 – 07 – 10.

[9] 何冯光, 张伟, 李明, 等. 甘蔗种植机排种装置的现状及发展趋势[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(6): 82 – 88.
HE Fengguang, ZHANG Wei, LI Ming, et al. The situation and development trend of planting unit for sugarcane planting machine[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018, 30(6): 82 – 88. (in Chinese)

[10] NAMJOO M, RAZAVI J. Development and evaluation of a new double-row sugarcane billet planter with overlap planting pattern[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America, 2014, 45: 57 – 64.

[11] WANG M, LIU Q, OU Y, et al. Experimental study of the seed-filling uniformity of sugarcane single-bud billet planter[J]. Sugar Tech., 2021, 23: 827 – 837.

[12] NAIK R, ANNAMALAI S J K, NAIR N V, et al. Studies on mechanisation of planting of sugarcane bud chip settlings raised in protrays[J]. Sugar Tech., 2013, 15: 27 – 35.

[13] 梁栋. 甘蔗排种器的探讨[J]. 广东农机, 1999(3): 25 – 27.

[14] 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)

[15] 何永玲, 吴飞, 李尚平, 等. 甘蔗横向种植机补种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 94 – 102, 138.
HE Yongling, WU Fei, LI Shangping, et al. Design and test of replenishment system for sugarcane horizontal planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 94 – 102, 138. (in Chinese)

[16] 张学军, 程金鹏, 史增录, 等. 摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 38 – 50.
ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, SHI Zenglu, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing-clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 38 – 50. (in Chinese)

[17] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿, 等. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51 – 59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing, et al. Design and test of electronic control seeding system for maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51 – 59. (in Chinese)

- [18] 杨硕,王秀,高原源,等. 支持转速现场标定的玉米精密排种器电驱控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(1): 47–55.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Investigation on motor-driving maize precision seed meter system supporting on-site calibration of rotate speed of seed plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 47–55. (in Chinese)
- [19] 康启新,张国忠,郑侃,等. 勺夹式耑头排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(5):15–25.
KANG Qixin, ZHANG Guozhong, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of the spoon clip type seed metering device for Allium Chinense[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(5): 15–25. (in Chinese)
- [20] 张甜,蒋乐,李兆东,等. 光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1):64–74, 145.
ZHANG Tian, JIANG Le, LI Zhaodong, et al. Seed flow detection system of optical fiber counting rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 64–74, 145. (in Chinese)
- [21] 张惠,潘峰,纪超,等. 浅谈我国电驱动精量排种器研究进展[J]. 南方农机, 2022,53(23):20–24.
ZHANG Hui, PAN Feng, JI Chao, et al. Brief analysis on research progress of electric drive precision seeder in China[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(23): 20–24. (in Chinese)
- [22] 麻芳兰,刘天翔,李尚平,等. 预切种式甘蔗横向排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):72–81.
MA Fanglan, LIU Tianxiang, LI Shangping, et al. Design and test of transverse planter for pre-cut sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 72–81. (in Chinese)
- [23] WANG M, LIU Q, OU Y, et al. Numerical simulation and verification of seed-filling performance of single-bud billet sugarcane seed-metering device based on EDEM[J]. Agriculture, 2022, 12(7): 983.
- [24] 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):43–50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43–50. (in Chinese)
- [25] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115–122, 142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115–122, 142. (in Chinese)
- [26] 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 Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Failure tests of sugarcane stalks under torsion, compression and tension load[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 201–204. (in Chinese)
- [27] 麻芳兰,梁叶杭,李尚平,等. 预切式甘蔗横向种植机供种装置的改进设计与试验研究[J]. 农机化研究,2022,44(5): 176–182.
MA Fanglan, LIANG Yehang, LI Shangping, et al. Improved design and experimental research on seed supply device of pre-cut sugarcane transverse planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 176–182. (in Chinese)
- [28] 丁幼春,刘伟鹏,董万静,等. 基于排种频率实时反馈的油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(6):73–82, 116.
DING Youchun, LIU Weipeng, DONG Wanjing, et al. Design and experiment of seed metering device for rapeseed based on seeding frequency feedback[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 73–82, 116. (in Chinese)
- [29] 段玉龙,许洪振,刘姣娣,等. 基于自适应模糊 PID 算法的蔗种调向装置定位控制[J/OL]. 控制工程: 1–9(2023–06–07)[2023–09–13]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220382>. DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.20220382.
DUAN Yulong, XU Hongzhen, LIU Jiaodi, et al. Positioning control of sugarcane seed steering de-vice based on adaptive fuzzy PID algorithm[J/OL]. Control Engineering of China: 1–9. (in Chinese)
- [30] 李锡文,姜德美,谢守勇. 步进电动机加速运行控制研究[J]. 微电机,2007(10):45–47.
LI Xiwen, JIANG Demei, XIE Shouyong. Studying on control of step motor accelerative running[J]. Micromotors Servo Technique, 2007(10): 45–47. (in Chinese)