

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.009

预切种式甘蔗横向排种器设计与试验

麻芳兰¹ 刘天翔¹ 李尚平² 罗晓虎¹ 吴 飞¹ 玉运发¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西民族大学信息科学与工程学院, 南宁 530006)

摘要: 为实现蔗种精准横向播种,设计了一种预切种式甘蔗横向排种器。通过对蔗种在排种器中的运动分析和基于 Recurdyn 软件的排种器运动仿真,探究排种器传送链轴转速、提升传送链倾角和集蔗箱倾角对排种性能的影响。利用自制的简易链式甘蔗排种器试验平台,对排种器的一级链轴转速、传送链倾角和集蔗箱倾角等参数进行试验研究,结果表明:传送链倾角和一级链轴转速对排种性能具有极显著的影响,集蔗箱倾角对排种性能的影响不显著;排种性能的最优参数组合为传送链倾角 55°、链轴转速 9.16 r/min、集蔗箱倾角 45°。室内验证试验表明,排种器的合格率为 92.6%、漏植率为 5%、重植率为 3.2%,说明排种器能有效避免排种过程的重植和漏植现象,减少播种过程的耗种量。田间验证试验表明,排种方向合格率 93.37%,排种株距合格率 90.33%,排种株距在 33 ~ 49.5 cm 的合理株距范围内,实现了双蔗芽蔗种的精准横向播种。

关键词: 甘蔗精准种植; 预切种式; 横向播种; 双蔗芽蔗种; 链式排种器

中图分类号: S223.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0072-10 OSID: 

Design and Test of Transverse Transplanter for Pre-cut Sugarcane

MA Fanglan¹ LIU Tianxiang¹ LI Shangping² LUO Xiaohu¹ WU Fei¹ YU Yunfa¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. College of Information Science and Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China)

Abstract: In order to realize the accurate horizontal seeding of sugarcane seeds, a kind of pre-cutting sugarcane transplanter was designed. The influence that the speed of seed metering chain, angle of chain and angle of cane box made on the performance of planting was confirmed by analyzing the movement of the planting device and the simulation study. By using the sugarcane planter test platform, the physical experiments of the first-stage chain speed, the angle of conveyor chain inclination and the cane box inclination angle of planting device were carried out. The experiment results showed that the angle of chain had a very significant impact on the performance of planter. The speed of chain shaft and angle of box had no significant effect on the performance of planter. The order of primary and secondary factors affecting performance was the angle of conveyor chain, rotation speed of chain shaft, and inclination angle of cane box. There was no interaction between these factors. The optimal value of chain angle was 55°, the best value of chain shaft speed was 9.16 r/min, the best inclination angle of cane box was 45°. In performance verification experiments, missing seed rate was 5%, replanting rate was 3.2% and pass rate was 92.6%. The reseed phenomenon during the planting can be effectively avoided. The seed consumption can be reduced during the planting process, and the missing seed phenomenon can also be avoided during the planting process. The qualified rate of seed metering direction was 93.37%, and the qualified rate of seed metering plant spacing was 90.33%. The spacing of planting was between 33 cm and 49.5 cm (a reasonable range), and the precise horizontal planting of double-buds section sugarcane can be realized.

Key words: precision planting of sugar cane; pre-cutting; horizontal sowing; sugarcane species; chain seeder

收稿日期: 2019-10-06 修回日期: 2019-10-29
基金项目: 广西科技开发重点项目(桂科 AB18281016)和亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室开放项目(SKLCUSA-b201706)
作者简介: 麻芳兰(1976—),女,教授,主要从事甘蔗机械设计研究,E-mail: 64016898@qq.com
通信作者: 李尚平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事甘蔗机械设计研究,E-mail: spli501@vip.sina.com

0 引言

广西壮族自治区甘蔗机械化种植约占 56%，主要采用实时切种种植技术,该种植方式沿垄沟纵向播种^[1],其劳动强度较大、用种多、单位面积出苗量不高,且易被大风吹倒。此外,实时切种式甘蔗排种器不能识别蔗芽,易对其损伤,影响了甘蔗的出芽率^[2]。

根据甘蔗良种良育的要求,预切种式甘蔗横向播种方式消耗蔗种少(耗种 4 500 ~ 5 250 kg/hm²)、种植密度分布均匀、单位面积出苗率较高、抗倒伏能力强,且能避免伤芽情况,有利于促进甘蔗的高产,是一种新的甘蔗种植良种良法。

目前,我国预切种式甘蔗种植机尚处于研究阶段,技术尚未成熟,如国内的覃豪中等^[3]研究的 Z908 型预切种式甘蔗种植机的链式排种器和国外 MOSLEM^[4]研究的链式排种器,由于排种器结构和蔗槽设计不合理,出现因排种不连续而造成漏种和耗种量大的情况,无法实现甘蔗的精准种植要求^[5]。并且,预切种式种植机主流播种方式为纵向播种,容易漏种,尚未实现精准种植。目前,市场上尚无适用于甘蔗横向播种的种植机械,甘蔗横向播种的种植工作主要由人工完成,其生产成本高、劳动强度大、工作效率低。

针对预切种式甘蔗横向播种技术难题,本文设计一种预切种式甘蔗横向排种器。通过对排种器的机理分析、运动仿真分析,利用自制试验平台研究排种器传送链速度、排种器传送链倾角等因素对排种性能的影响,并研发试验样机进行性能验证试验^[6-8]。

1 结构与工作原理

1.1 整体结构

预切种式甘蔗横向种植机整机结构示意图如图 1 所示。预切种式甘蔗横向排种器(如图 2 所示)主要由一级提升传送链、二级换向传送链、机架、挡板、集蔗箱、清种装置和传动系统部件等组成^[9-10]。预切种式甘蔗横向种植的农艺要求为双芽蔗、双行横向种植,具体种植要求为:重植率小于等于 5%、漏植率小于等于 5%、合格率大于等于 90%、行距 1.4 m、株距 330 mm、排种方向为横向。

1.2 工作原理

预切种式甘蔗横向排种器采用上排种的工作方式。排种器的一级提升传送链由 3 组链轮呈三角形分布,有倾角段的提升链与集蔗箱构成倒三角形的截面,如图 3 所示,蔗种在种间挤压力及自身重力的

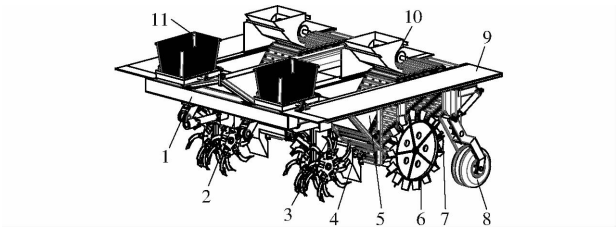


图 1 预切种式甘蔗横向种植机结构示意图

Fig. 1 Sketch of pre-cut sugarcane transverse planting machine

1. 机架 2. 变速传动机构 3. 开沟器 4. 施肥机构 5. 排种器
6. 地轮 7. 覆土机构 8. 调深辅助轮组 9. 活动平台板 10. 补种装置 11. 蔗种箱

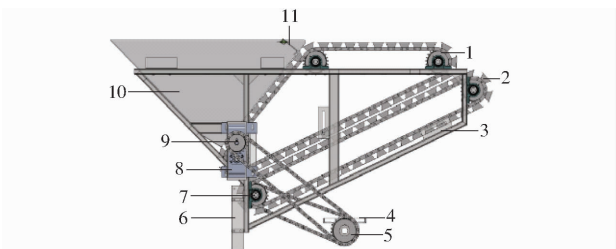


图 2 预切种式甘蔗横向排种器结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of pre-cut sugarcane transverse seed metering device

1. 一级提升传送链 2. 二级换向传送链 3. 机架 4. 轴承座
5. 地轮轴 6. 挡板 7. 二级换向传送链输入轴 8. 齿轮箱
9. 一级提升传送链输入轴 10. 集蔗箱 11. 清种装置

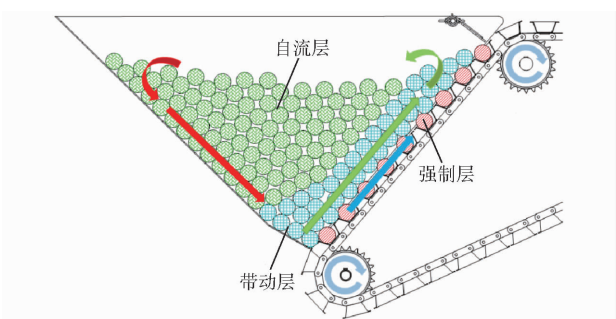


图 3 集蔗箱内种子流运动情况

Fig. 3 Movement of seed flow in container of collecting cane

作用下自动充种进入蔗槽^[11]。

首先,蔗种随着一级提升传送链的转动向上运动,蔗槽上多余的蔗种由于链条振动和自身的重力作用回落至集蔗箱底部,结合清种装置有效地降低重植率。设置一级提升传送链的水平段,当出现蔗槽缺蔗的现象,结合实时补种装置能及时补蔗^[12]。

蔗种传送至一级提升传送链末端,为了降低投种高度,减少蔗种掉落势能,在一级提升传送链底部设置二级换向传送链,保证两链传送落种的精确性。

最后,蔗种随着二级换向传送链的转动向下运动,落入开沟器开好的沟槽中。

2 双芽段蔗种在排种器中的运动分析

2.1 集蔗箱中蔗种的运动分析

蔗种在集蔗箱中根据运动特性划分为强制层、带动层和自流层^[13-15],如图3所示。已进入蔗槽的蔗种为强制层,排种器工作时,蔗种被蔗槽强制排出;未能进入蔗槽并靠近强制层的蔗种为带动层,在排种器工

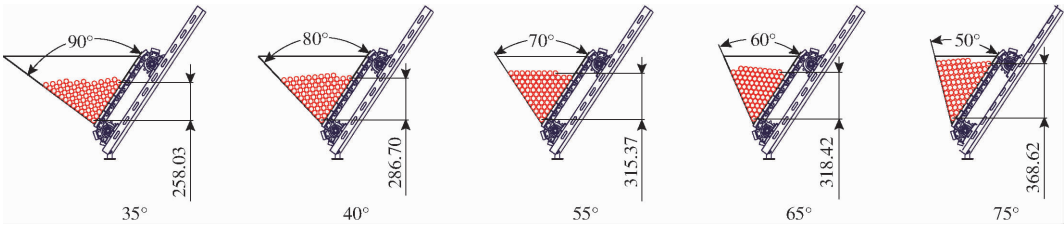


图4 集蔗箱不同倾角集蔗箱容蔗情况

Fig. 4 Sugarcane container with different dip angles in collecting box

2.3 传送链的链速度对充种性能的影响

传送链的链速度 v 对蔗槽的充种性能影响很大,当速度过高,蔗种来不及进入蔗槽,造成漏播。假定双芽段蔗种为均质规则的圆柱形,沿倾角为 θ 的蔗槽上边缘向下滚动,靠自重落入蔗槽。选取蔗种质心为原点,蔗种在蔗槽边缘处受力分析如图5所示,蔗槽对蔗种的支撑力为 F_N ;蔗槽与蔗种间的滚动摩擦力为 F_s ;蔗种的惯性力为 F_g 。

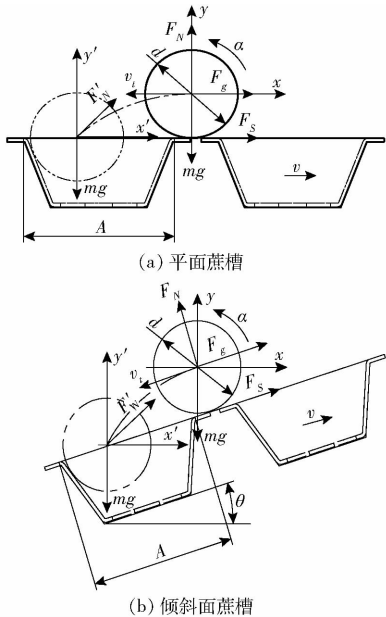


图5 蔗槽种子充填受力分析

Fig. 5 Analysis of filling force of sugarcane groove seeds

设蔗种与蔗槽接触处足够粗糙,此时蔗种作纯滚动,平面运动方程为

$$F_s = mg\sin\theta - ma \tag{1}$$

$$F_N = mg\cos\theta \tag{2}$$

$$\frac{1}{2}mr^2\alpha = F_sr \tag{3}$$

作时因蔗种间摩擦力作用也被带动,靠近强制层周围界面上的蔗种速度最大,距蔗槽越远速度越小;在蔗种带动层外则是自流层,由自身重力作用做自流运动。

2.2 集蔗箱倾角对充种性能的影响

如图4所示,在集蔗箱的蔗种数量相同的情况下,集蔗箱倾角越大,箱内蔗种相对高度越高,蔗种间挤压力越大,充种效率越高。

式中 m ——蔗种质量, g
 g ——重力加速度, m/s^2
 θ ——传送链倾角, $(^\circ)$
 a ——蔗种质心加速度, m/s^2
 α ——蔗种滚动质心角速度, rad/s
 r ——蔗种平均半径, mm

纯滚动条件

$$a = r\alpha \tag{4}$$

速度与位移的关系为

$$v_i^2 = v_0^2 + 2as \tag{5}$$

式中 s ——路程

滚动摩擦力为

$$F_s = \frac{1}{2}ma \tag{6}$$

由公式(1)~(6)计算得

$$v_i = \sqrt{2as + v_0^2} \tag{7}$$

$$a = \frac{2}{3}g\sin\theta \tag{8}$$

$$F_s = \frac{1}{3}mg\sin\theta \tag{9}$$

式中 v_i ——蔗种质心的末速度, m/s
 v_0 ——蔗种质心的初速度, m/s

图5b为倾角传送链上蔗种的充种情况,在时间 t 内蔗种必须通过的路程 s 为

$$s = v_{\max}t = A - \frac{d}{2} \tag{10}$$

其中 $v_{\max} = v + v_i + gt\sin\theta$ (11)

式中 $v_{\max}$ ——蔗种脱离蔗槽最大速度, m/s

v ——传送链速度, m/s

A ——蔗槽上宽,取 55 mm

d ——蔗种平均直径,取 35 mm

必须下落到型孔的距离为

$$\frac{d}{2} = \frac{1}{2}gt^2 \cos\theta \tag{12}$$

为使种子稳定地填充到型孔,则由式(7)~(12)计算得

$$v \leqslant \left(A - \frac{d}{2}\right) \sqrt{\frac{g \cos \theta_{\max}}{d}} - g t \sin \theta_{\max} - \sqrt{\frac{2 g \sin \theta_{\max}}{3}} \tag{13}$$

式中 $\theta_{\max}$ ——传送链最大倾角,取 69.3° (此时蔗槽斜面与水平面平行)

由公式(13)得传送链速度 $v \leqslant 16.48 \text{ m/s}$ 时,蔗种能稳定落入蔗槽内。

2.4 提升传送链倾角对清种性能的影响

提升传送链倾角对重力清种的效果具有重要影响,叠加种子如未能及时回落至集蔗箱底部,则会增加重植现象。若假定双芽段蔗种为均质规则的圆柱形,选取蔗种质心为原点,蔗种在蔗槽边缘处受力分析如图 6 所示。

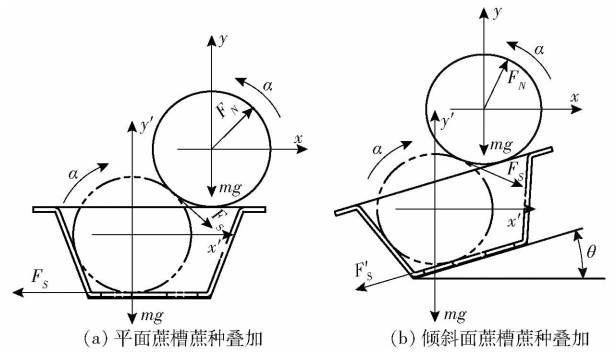


图 6 蔗槽种子叠加受力分析

Fig. 6 Stress analysis of sugarcane trough seed

回转运动动能为

$$E_K = \frac{1}{2}J\alpha^2 \tag{14}$$

式中 J ——转动惯量

需要克服的重力势能为

$$E_P = mgh \tag{15}$$

式中 h ——高度

转动惯量^[16]为

$$J = \int dJ = \frac{1}{2}mr^2 \tag{16}$$

由能量守恒定律得

$$\sum E = E_K + E_P = 0 \tag{17}$$

由公式(4)、(14)~(17)化简得

$$\sum E = \frac{1}{9}mgsin^2\theta - mgh \tag{18}$$

由式(18)可知,传送链的倾角越大,回转运动动能越大,需要克服的重力势能越小,所以传送链的倾角越大越有利于蔗种自身重力清种,能减少排种

器的重植现象。

2.5 二级换向传送链运动分析

当蔗种由蔗槽传送至一级和二级传送链的末端,蔗槽绕着链轮作旋转运动,此时蔗种受自身重力、蔗槽作用力和离心力共同作用。选择蔗种为研究对象,受力分析如图 7 所示。

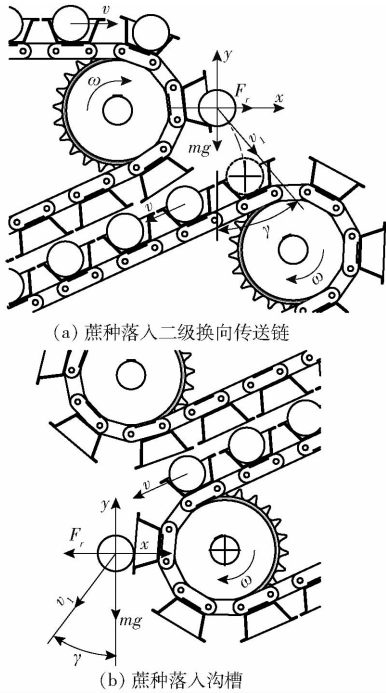


图 7 投种受力分析

Fig. 7 Stress analysis of seed feeding

蔗种作斜抛运动,蔗种质心运动微分方程两次积分运算得

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = 0 \\ m \frac{dv_y}{dt} = -mg \end{cases} \tag{19}$$

式中 v_x ——蔗种速度水平方向分量, m/s

v_y ——蔗种速度竖直方向分量, m/s

推得

$$\begin{cases} x = c_1 + c_3 \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 - c_2 - c_4 \end{cases} \tag{20}$$

式中 c_1, c_2, c_3, c_4 ——常数

运动方程为

$$\begin{cases} x = v_1 t \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \\ y = -v_1 t \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{21}$$

轨迹方程为

$$y = -x \tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \frac{1}{2}g \frac{x^2}{v_1^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)} \tag{22}$$

式中 x ——水平方向位移,mm
 y ——竖直方向位移,mm
 v_1 ——蔗种投出的初速度,m/s
 γ ——蔗种投出速度方向夹角,(°)
 t ——蔗种掉落时间,s

2.6 蔗槽设计

蔗槽的主要功能是能够较好地容纳并取出一个双蔗芽蔗种,随着一级提升传送链向上运动,在运动的过程中保持平稳不掉落。实际上甘蔗形状不是规则统一的圆柱体,甘蔗段母线也非直线(图8)。设计蔗槽除了考虑双蔗芽蔗种的蔗段直径、蔗节直径和平均直径外,还需要考虑双蔗芽蔗种的弯曲程度。



图8 双蔗芽蔗种形状

Fig.8 Shape of sugarcane seed with double sugarcane bud

蔗槽长度:双蔗芽蔗种长度一般为300mm左右,在实际生产中对超过350mm的蔗种进行剔除,蔗槽长度设计为350mm。

蔗槽宽度:考虑本试验双蔗芽蔗种平均直径约为35mm,考虑甘蔗的弯曲程度,蔗槽截面为上宽下窄梯形,相比矩形的蔗槽截面不会出现两个蔗种同时与蔗槽底部接触的情况,造成卡蔗的现象。

蔗槽高度:要保证蔗种在蔗槽提升过程中保持稳定,不从蔗槽掉落,槽口高度应高于蔗种质心高度。为了使清种工作有效,叠加在蔗槽上的蔗种的质心高度应远高于槽口高度。不同尺寸蔗种在蔗槽容蔗情况如图9所示。

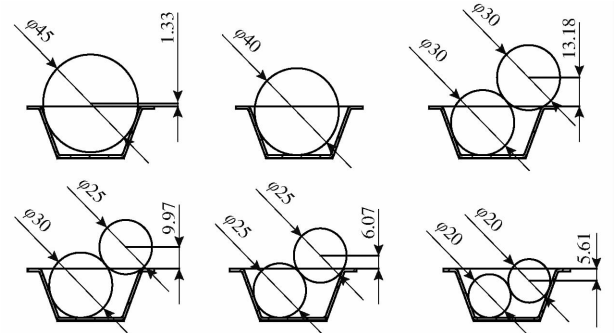


图9 不同尺寸蔗种在蔗槽的容蔗情况

Fig.9 Sugarcane tolerance of different sizes of sugarcane varieties in sugarcane trough

3 基于 Recurdyn 的排种器运动仿真

3.1 仿真试验模型与试验方案

3.1.1 仿真试验模型

采用 Recurdyn 仿真软件建立复杂的传送链系

统的动力学模型,Recurdyn 专业模块中的链条分析模块具有建模快捷的优点,提高了设计效率^[17-20]。在 Recurdyn 中建立预切种式甘蔗横向排种器简化模型,如图10所示。

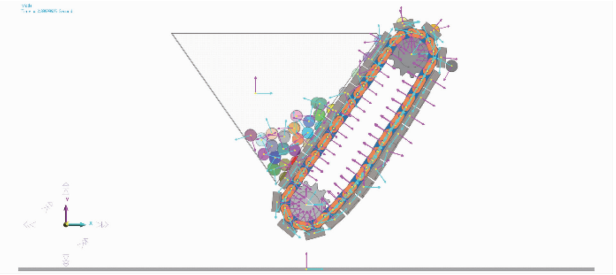


图10 预切种式甘蔗横向排种器简化模型

Fig.10 Simplified model of transverse seed metering device for sugarcane with pre-cutting seed

3.1.2 虚拟仿真试验方案

通过排种器的链轴转速分别为6.11、9.16、13.74 r/min 的虚拟仿真试验,对比仿真过程集蔗箱蔗种排序状况,研究提升链链速度对排种性能的影响。

通过排种器的一级提升传送链的倾角分别为40°、55°、69.3°的虚拟仿真试验,对比仿真过程集蔗箱蔗种排序状况,研究提升链倾角对排种性能的影响。

3.2 仿真试验结果分析

3.2.1 链轴转速对排种性能的影响

不同链轴转速仿真试验结果如图11所示,结果表明:链轴转速越小,漏种越少,排种效果越好;链轴转速越大,漏种越多,排种效果越差。

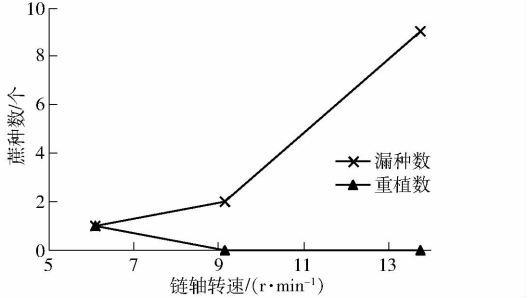


图11 不同链轴转速仿真试验结果

Fig.11 Simulation test of axis speed

为方便观察集蔗箱和蔗槽内的蔗种运动情况,将部分零件隐藏,图12a为链轴转速9.16 r/min 在3.09 s 的排种情况,图12b 为链轴转速13.74 r/min 在2.60 s 的排种情况。通过对比可知,链轴速度越大,集蔗箱内蔗种排序越混乱,影响蔗种充入蔗槽效果,造成排种器漏植情况或使排种器不能正常工作。

3.2.2 传送链倾角对排种性能的影响

不同传送链倾角仿真试验结果如图13所示,结果表明:倾角越小,漏种越少,排种效果越好;倾角越

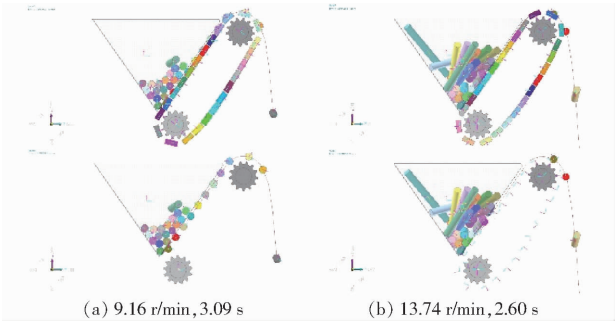


图 12 排种器不同链轴转速的仿真过程

Fig. 12 Simulation process of different chain axis speeds of programmer

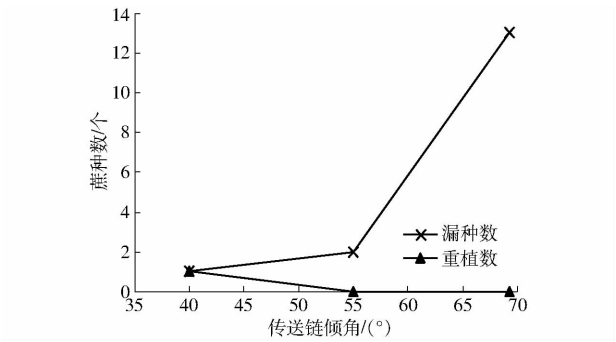


图 13 不同传送链倾角仿真试验结果

Fig. 13 Simulation test results of transport chain inclination angle

大,漏种越多,排种效果越差。

图 14a 为倾角 40°在 3.35 s 的排种情况,图 14b 为倾角 69.3°在 3.35 s 的排种情况。通过对比可知,倾角越大,蔗槽对蔗种支撑作用力小,蔗种易掉出蔗槽致使集蔗箱内蔗种排序混乱,造成排种器漏植情况。

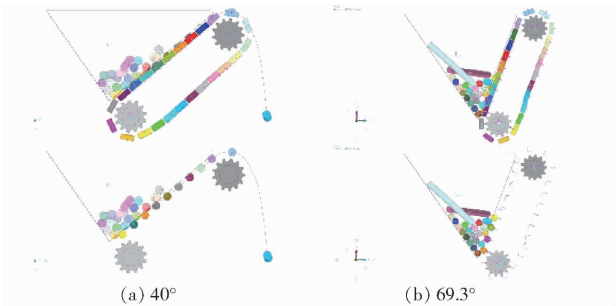


图 14 排种器不同倾角仿真过程

Fig. 14 Simulation process of seed metering device at different angles

4 台架试验与结果分析

4.1 台架试验及方法

4.1.1 试验平台

试验平台是自制的简易链式排种器,如图 15 所示,由可调节角度的集蔗箱和可调节角度的提升传送链组成,提升传送链设置 9 个蔗槽,动力由可调速

的步进电机提供,在进行试验前首先用激光测速仪对链轴的转速进行标定。



图 15 简化的链式排种器试验台

Fig. 15 Simplified chain seed metering device

1. 提升链 2. 步进电机 3. 调速器 4. 机架 5. 集蔗箱

4.1.2 试验参数与评价指标

本节试验参数为:排种器的一级链轴转速 A 、传送链倾角 B 和集蔗箱倾角 C ,试验指标为:排种器的重植率、漏植率和合格率,分别安排单因素试验和正交试验。

4.1.3 试验材料

试验采用的蔗种为中蔗 9 号,生长期为半年,每段蔗种上有两个及以上的蔗芽,且蔗种的曲度小。随机选取切好的 100 根长度均为 300 mm 的双芽段蔗种,用游标卡尺进行测量,测量结果如表 1 所示。

表 1 双芽段蔗种蔗段和蔗节直径统计参数

Tab. 1 Statistical parameters of sugarcane sectors and sugarcane sects in double-bud sectors

参数	蔗段	蔗节
平均值/mm	34.83	35.72
标准差/mm	2.11	1.95
方差/mm ²	4.45	3.82
最小值/mm	30.0	31.5
最大值/mm	39.67	41.50
变异系数	0.06	0.05

4.1.4 试验方法

按照试验安排,将蔗种有序摆放于集蔗箱内,集蔗箱的蔗种数量为 80 根。开启电机,蔗槽将集蔗箱内蔗种向上提升;待集蔗箱的蔗种全部排出后,关闭电机。将排出的蔗种再次倒入集蔗箱,各因素重复试验 3 次。采用高速摄像机对蔗种传送数据进行采集^[21],通过数据和试验现象分析各因素对排种性能的影响。

4.2 链轴转速单因素试验

试验条件:选取中间值,传送链倾角 B 为 55°,集蔗箱倾角 C 为 55°,试验水平如表 2 所示。

表 2 链轴转速水平

Tab. 2 Chain shaft speed level

水平	1	2	3	4	5
链轴转速 $A/(r \cdot \min^{-1})$	6.11	9.16	13.74	18.31	24.41
落种间隔/s	1.50	1.00	0.75	0.50	0.375

试验结果如图 16 所示,当链轴转速为 13.74 r/min 时,排种器的合格率最高,为 95.85%。随着链轴转速的增加,排种器的重植率降低,而排种器的漏植率增加。

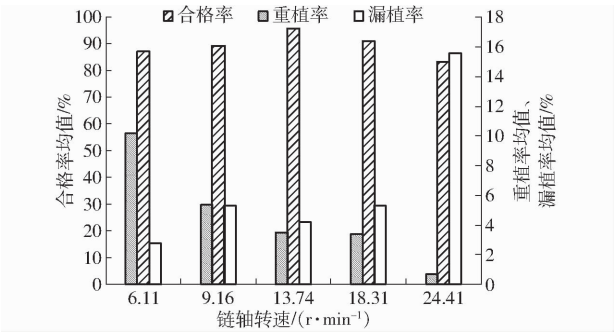


图 16 传送链链轴转速试验结果

Fig. 16 Test results of speed of chain shaft

当链轴转速小时,传送链的抖动小,叠加蔗槽上蔗种受到外界合力小于蔗种与蔗槽间的最大摩擦力,容易随着蔗槽提升运动被带出从而造成重植率高;当链轴转速增大时,传送链的振动和抖动增大,已充入蔗槽的蔗种因抖动而掉落,从而造成漏植率高。

排种器漏植现象主要集中在排种后段。在排种后段集蔗箱内只有少量蔗种,上层蔗种群对下层蔗种群挤压力变小,当蔗槽向上提升时,接近蔗槽边缘的蔗种的排序容易乱,蔗种间出现交叉现象。图 17 为排种过程 45、49、54 s 时的集蔗箱内蔗种的排序情况,下层蔗种交叉,上层的蔗种不能有效地充入蔗槽中,造成漏种情况。在实际的种植机中,由于种箱很大,出现这种情况的几率较小。

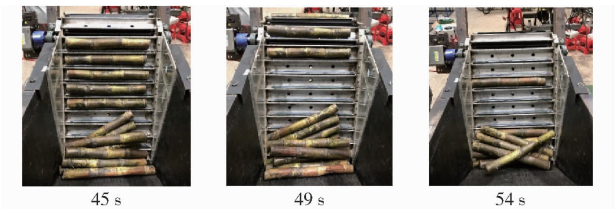


图 17 蔗种间交叉现象

Fig. 17 Interspecific crossing of sugarcane

4.3 传送链倾角单因素试验

试验条件:传送链轴转速为 9.16 r/min,集蔗箱倾角为 55°,试验水平如表 3 所示。

表 3 传送链倾角水平

Tab.3 Chain inclination angle level					
水平	1	2	3	4	5
传送链倾角 B/(°)	45	50	55	60	65

试验结果如图 18 所示,在传送链倾角为 60° 时,排种器的合格率最高,为 89.84%。

随着传送链倾角的增加,排种器的漏植率增加,排种器的重植率降低。

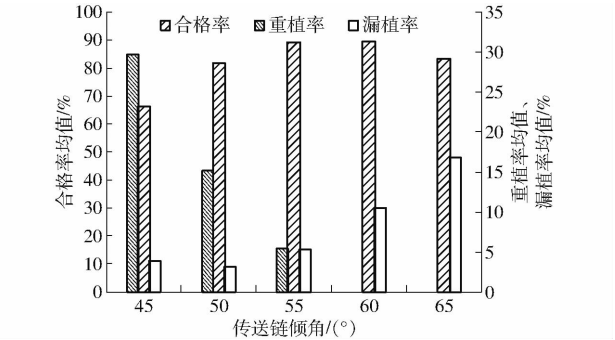


图 18 传送链倾角试验结果

Fig. 18 Test results of transport chain inclination angle

当传送链倾角变小时,重力清种效率低,蔗槽上存有多余的蔗种,随着蔗槽提升运动被带出,从而造成重植率高;当传送链倾角变大时,蔗槽斜面对已充入蔗槽蔗种的支撑力变小,蔗槽的蔗种极易因传送链运转时抖动而从蔗槽掉落。

排种器重植现象集中在排种前段。当传送链倾角小时,蔗种重力清种的作用小和清种空间小,此时位于集蔗箱上层靠近提升链蔗槽被动层的蔗种群易被带出。排种器重植现象如图 19 所示。



图 19 排种器重植现象

Fig. 19 Superposition between cane species

4.4 集蔗箱倾角单因素试验

试验条件:传送链轴转速为 9.16 r/min,传送链倾角为 55°,试验水平如表 4 所示。

表 4 集蔗箱倾角水平

Tab.4 Concentrate inclination angle level					
水平	1	2	3	4	5
集蔗箱倾角 C/(°)	35	45	55	65	75

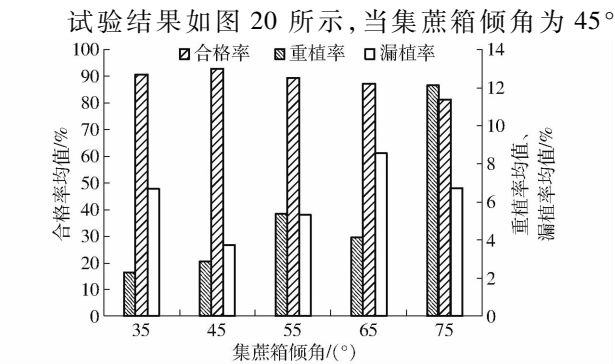


图 20 传送链倾角试验结果

Fig. 20 Test results of transport chain inclination angle

时,排种器的合格率最高,为 92.98%。应图如图 21 所示。

4.5 正交试验

综合考虑链轴转速 A 、传送链倾角 B 和集蔗箱倾角 C 对排种器排种性能的综合影响。试验为三因素五水平正交试验,采用 $L_{25}(5^6)$ 正交试验表。因素水平如表 5 所示。为了提高统计分析精确性和可靠性,每组试验重复 3 次,取得重植率、漏植率、合格率的和,对试验数据进行单向干扰控制后,进行方差分析。方差分析结果如表 6 所示。排种器各因素效

表 5 正交试验因素水平

水平	试验因素		
	链轴转速	传送链倾角	集蔗箱倾角
	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/(^{\circ})$	$C/(^{\circ})$
1	6.11	45	35
2	9.16	50	45
3	13.74	55	55
4	18.31	60	65
5	24.41	65	75

表 6 重植率、漏植率、合格率方差分析

Tab.6 ANOVA of replantation rate, leakage rate and pass rate

	方差来源	平方和	自由度	均方	F	临界值 F_{α}	P	显著性
重植率	链轴转速 A	284.25	4	71.06	11.38	$F_{0.01} = 3.46$	5.38×10^{-8}	***
	传送链倾角 B	8 248.59	4	2 062.15	330.20	$F_{0.01} = 3.46$	5.84×10^{-69}	***
	集蔗箱倾角 C	174.55	4	43.64	6.99	$F_{0.01} = 3.46$	3.81×10^{-5}	***
	误差 1	62.32	4					
	误差 2	52.98	4					
	误差 3	86.19	4					
	重复误差	497.96	112					
	总误差	699.45						
	总计	10 106.29	136					
漏植率	链轴转速 A	3 272.94	4	818.24	48.93	$F_{0.01} = 3.46$	1.91×10^{-25}	***
	传送链倾角 B	3 997.89	4	999.47	59.77	$F_{0.01} = 3.46$	4.86×10^{-29}	***
	集蔗箱倾角 C	506.26	4	126.57	7.57	$F_{0.01} = 3.46$	1.55×10^{-5}	***
	误差 1	469.32	4					
	误差 2	348.42	4					
	误差 3	0	4					
	重复误差	1 055.11	112					
	总误差	1 872.85						
	总计	11 522.79	136					
合格率	链轴转速 A	1 805.52	4	451.38	6.87	$F_{0.01} = 3.46$	4.55×10^{-5}	***
	传送链倾角 B	6 817.00	4	1 704.25	25.95	$F_{0.01} = 3.46$	5.45×10^{-16}	***
	集蔗箱倾角 C	470.96	4	117.74	1.79	$F_{0.01} = 3.46$	1.34×10^{-1}	*
	误差 1	0	4					
	误差 2	554.09	4					
	误差 3	1 057.53	4					
	重复误差	5 745.22	112					
	总误差	7 356.77						
	总计	23 807.02	136					

注: * 表示差异不显著 ($P > 0.05$); *** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

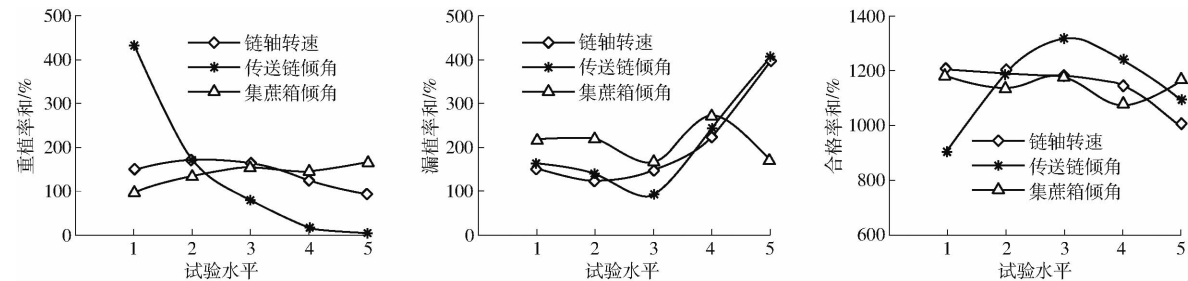


图 21 排种器各因素效应图

Fig. 21 Effect diagrams of each factor of seed metering device

通过极差分析可知,影响排种器排种性能的因素主次顺序为:传送链倾角 B 、链轴转速 A 、集蔗箱倾角 C 。如表 6 所示,当置信区间为 0.01 时,传送链倾

角 B 、链轴转速 A 对合格率的影响极显著;集蔗箱倾角 C 对合格率的影响不显著。

排种器排种合格率的最优组合参数为:传送链倾角为 55° 、链轴转速为 9.16 r/min 、集蔗箱倾角为 45° 。

5 排种性能验证试验

5.1 预切种式甘蔗横向排种器样机

根据试验结果优化排种器后,进行预切种式甘蔗横向种植机整机的研制工作,其中预切种式甘蔗横向排种器样机及布置如图 22 所示。

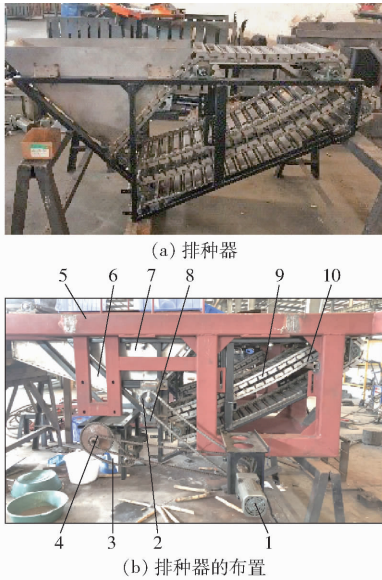


图 22 预切种式甘蔗横向排种器样机及布置
Fig. 22 Prototype and arrangement of pre-cut sugarcane transverse seed metering device

1. 步进电机 2. 排种器传动链条 3. 施肥机构 4. 施肥传动链条 5. 种植机机架 6. 肥料箱 7. 集蔗箱 8. 排种器齿轮箱 9. 排种器一级提升传送链 10. 排种器二级换向传送链

5.2 验证试验

5.2.1 室内验证试验

在种植机样机下方放置一条长度为 6 m 的传送带,以模拟种植机在田间工作行走的状态;将地轮拆除,使用可调速的步进电机模拟样机排种的相对行进速度。试验指标有排种器的合格率、重植率、漏植率和排种器功率。试验条件为:链轴转速 9.16 r/min 、传送链倾角 55° 、集蔗箱倾角 45° 、地轮轴转速 21 r/min 、蔗箱蔗种 100 根。

试验结果如表 7,结果表明:排种器的漏植率为 5% 、重植率为 3.2% 、合格率为 92.6% 。蔗种间距均匀(图 23a),种肥间隔合理。肥料掉落区域正好位于两根蔗种之间(图 23b),避免肥料落在蔗芽上造成烧苗现象。满足预切种式甘蔗横向排种器的设计要求。

5.2.2 田间验证试验

预切种式甘蔗横向种植机安装调试后,根据

表 7 室内试验结果
Tab. 7 Laboratory test results

试验号	指标			
	重植率/%	漏植率/%	合格率/%	排种器功率/W
1	3	2	95	242.66
2	2	0	98	281.16
3	3	0	97	273.24
4	4	14	86	214.72
5	4	9	87	248.60
平均值	3.2	5	92.6	252.08

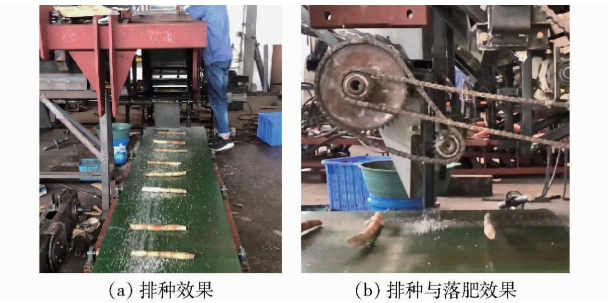


图 23 室内试验及排种效果
Fig. 23 Field experiment and seeding effect

《农业机械推广鉴定大纲》对预切种式甘蔗横向种植机进行验证试验分析,对播种均匀性进行测定。

田间试验结果如表 8 所示,试验结果表明:排种方向合格率 93.37% 、排种株距合格率 90.33% 、变异系数 0.39 、株距在 $33\sim49.5\text{ cm}$ 合理的株距范围内,基本符合甘蔗种植的排种间距要求。田间试验及排种效果如图 24 所示。

表 8 播种均匀性试验结果

Tab. 8 Test results of seeding uniformity						
试验次序	株距/cm	标准差/cm	株距变异系数	株距总变异系数	排种方向合格率/%	排种株距合格率/%
1	39.82	6.40	0.16			
2	40.91	10.12	0.25	0.39	93.37	90.33
3	45.03	22.90	0.51			

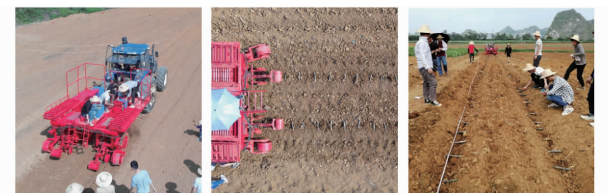


图 24 田间试验及排种效果
Fig. 24 Field experiment and seeding effect

6 结论

(1) 根据甘蔗横向播种要求和对现有预切种甘蔗种植机的分析,研制了一种预切种式甘蔗横向排种器。通过对排种器进行运动机理分析和运动仿真分析,确定影响排种性能的因素有传送链轴转速、传

送链倾角和集蔗箱倾角。

(2) 单因素试验结果表明：在链轴转速为 13.74 r/min 时，排种器的合格率最高，为 95.85%；在传送链倾角为 60°时，排种器的合格率最高，为 89.84%，有较好的排种效果；在集蔗箱倾角为 45°时，排种器的合格率最高，为 92.98%。

(3) 正交试验结果表明：传送链倾角、链轴转速对排种性能有极显著的影响；集蔗箱倾角对排种性能的影响不显著。影响排种性能的主次因素为：传送链倾角、链轴转速、集蔗箱倾角。

(4) 保证排种器排种合格的最优参数组合为：传送链倾角为 55°、链轴转速为 9.16 r/min、集蔗箱倾角为 45°。

(5) 室内验证试验结果表明：采用最佳组合参数的排种器能满足预切种式甘蔗横向播种的要求，排种器的合格率 92.6%、漏植率 5% 和重植率 3.2%。

(6) 田间验证试验结果表明：排种方向合格率 93.37%，排种株距合格率 90.33%，变异系数 0.39%，株距在 33~49.5 cm 的合理株距范围内，实现了双芽段蔗种的精准横向播种。

参 考 文 献

[1] 曹耀林. 2CZQ-2 型切种式甘蔗种植机的改进与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
CAO Yaolin. The improvement and experiment of seed cutting sugarcane planter of 2CZQ-2 type[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[2] 张国庆. 2CZX-2 型甘蔗健康种苗种植机的研制[D]. 海口: 海南大学, 2016.
ZHANG Guoqing. Research and development of sugarcane healthy seedling planter of 2CZX-2 type[D]. Haikou: Hainan University, 2016. (in Chinese)

[3] 覃豪中, 陈天涛, 黄金强, 等. 预切种式甘蔗种植机种植装置: CN205567068U[P]. 2016-09-14.

[4] MOSLEM. Development and e-valuation of a new double-row sugarcane billet planter with overlap planting pattern[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America: AMA, 2014, 45(2): 57-64.

[5] 莫璋红. 广西甘蔗收获机械化问题与对策研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
MO Zhanghong. Study on the problems and countermeasures of sugarcane harvesting mechanization in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese)

[6] 李瑞. 基于地轮驱动的甘蔗种植机设计与研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
LI Rui. Design and research of sugarcane planter based on ground wheel drive[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015. (in Chinese)

[7] 杨锴, 段宏兵, 宋波涛, 等. 半杯勾式马铃薯排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(2): 103-109.
YANG Kai, DUAN Hongbing, SONG Botao, et al. Design and trial of half-cup type potato seed-metering device [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 103-109. (in Chinese)

[8] 吕金庆, 王鹏榕, 杨晓涵, 等. 舀勾式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 51-60.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and test of seed clearing device for scoop type potato seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 51-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190705&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.005. (in Chinese)

[9] 李尚平, 陈保善, 刘天翔, 等. 一种预切种式开式双行横向智能甘蔗种植机: CN108781670A[P]. 2018-11-13.

[10] 李尚平, 陈保善, 刘天翔, 等. 一种预切种开式横向甘蔗播种器: CN108811639A[P]. 2018-11-16.

[11] 刘俊孝. 对置斜盘高速精密大豆排种器设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
LIU Junxiao. Design and experimental study of high speed and precision soybean seed metering device with opposite tilting disc [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[12] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 94-102, 138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.010. (in Chinese)

[13] 张小丽. 2BXJF-12 型小麦播种机的试验研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
ZHANG Xiaoli. Experimental study on wheat planter of 2BXJF-12 type[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2006. (in Chinese)

[14] 于红鹏. 2BDG-1 舵轮杠杆开启式穴播机[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.
YU Hongpeng. Steering wheel lever open hill-drill of 2BDG-1 type[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009. (in Chinese)

[15] 翟萌萌. 基于 EDEM 的小麦宽幅精量播种装置优化设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
ZHAI Mengmeng. Optimization design and experiment of wheat wide precision seeding device based on EDEM[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[16] 杨克昌. 均质圆柱类刚体对任意轴的转动惯量计算公式[J]. 力学与实践, 1983(5): 53-54.
YANG Kechang. A formula for calculating the moment of inertia of a rigid body like a homogeneous cylinder to an arbitrary axis [J]. Mechanics in Engineering, 1983(5): 53-54. (in Chinese)

[17] 沈仙法. 办公设备送纸机构动力学仿真及分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
SHEN Xianfa. Dynamic simulation and analysis of paper feeding mechanism of office equipment[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. (in Chinese)

[18] 孙齐磊, 张晓辉, 牟宗桂, 等. 排种器的机理及影响因素的研究[J]. 农机化研究, 2002, 24(3): 40-41.
SUN Qilei, ZHANG Xiaohui, MOU Zonggui, et al. Study on mechanism and influencing factors of seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(3): 40-41. (in Chinese)

[19] 程明. 基于 Recurdyn 链传动的仿真与分析[J]. 机械设计, 2013, 30(9): 42-46.
CHENG Ming. Simulation and analysis of chain transmission based on Recurdyn[J]. Machine Design, 2013, 30(9): 42-46. (in Chinese)

[20] CAI Changliang. Modeling and simulation of the tracked pipe duct cleaning robot based on the Pro/Engineer and RecurDyn [J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2014, 19(3): 180-185.

[21] 朱忠祥, 岳小微, 杜岳峰, 等. 玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 42-48.
ZHU Zhongxiang, YUE Xiaowei, DU Yuefeng, et al. Dynamic simulation and high-speed photography experiment on corn-ear husking[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 42-48. (in Chinese)