doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.018

横向摆种蔗段种植机隔板带式播种器设计与试验

麻芳兰　叶凤滋　蔚延涛　罗一鸣　苗金泽　段荣钢
（广西大学机械工程学院，南宁 530004）

摘要：为解决横向摆种蔗段种植机播种器存在的蔗段在传送链之间转换不稳定问题，实现蔗段均匀充排种，设计了一种由辊轮组及装有橡胶挡板的橡胶传送带组成的隔板带式横向摆种播种器。通过对蔗段在传送带上运动状态和基于 ADAMS 软件的播种器充种过程仿真，探究播种器传送带速度、传送带倾角和集蔗箱底部折角对充种性能的影响。利用播种器样机试验平台，对播种器传送带速度、集蔗箱蔗段数和传送带倾角等参数进行试验研究。结果表明，传送带速度 A 和集蔗箱内蔗段数 B 对充种合格率有极显著影响，传送带倾角 C 对充种合格率有显著影响，集蔗箱底部折角对充种合格率没有显著影响。对播种器充种合格率影响的主次顺序为 B、A、C，最优参数组合为：传送带速度、集蔗箱内蔗段数和传送带倾角分别为 8.16 m/min、20 根和 55°。在此参数组合下播种器充种合格率 95.4%，蔗段间距离合格率 99.4%，蔗段偏转角合格率 96.3%，各项指标均满足农艺要求。

关键词：甘蔗横向种植机；播种器；预切种式
中图分类号：S223.99　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)03-0186-10　　**OSID**：

Design and Experiment of Conveyor Belt Seeder with Partition for Sugarcane Transversal Planter

MA Fanglan　YE Fengzi　YU Yantao　LUO Yiming　MIAO Jinze　DUAN Ronggang
(*College of Mechanical Engineering*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*)

Abstract: Aiming to address the issue of unstable conversion of sugarcane segments between the transfer chain and achieve uniform filling and seeding of sugarcane segments, a baffle belt type transversal sowing seeder was designed, which was realized by a conveyor belt with partitions driven by a motor to rotate. The effects of conveyor belt speed, conveyor belt angle and the bottom angle of sugarcane collecting box on the performance of filling were investigated by analyzing the motion of sugarcane segments on the conveyor belt and simulating the motion of the seeder based on ADAMS. By using the prototype test platform, the speed of conveyor belt, the number of sugarcane segments in sugarcane collecting box and the angle of conveyor belt were studied. The results showed that the speed of the conveyor belt A and the number of sugarcane segments in sugarcane collecting box B had significant effects on the qualified rate of filling seed. The belt angle C had significant effect on the qualified rate of filling seed. The angle of the bottom angle of sugarcane collecting box had no significant effect on the qualified rate of filling seed. The order of the major and secondary influences of A, B and C on the qualified rate of filling seed was B, A and C. The optimal parameter combination $B_2A_2C_4$, that was, the speed of conveyor belt, the number of sugarcane segments in sugarcane collecting box and the angle of conveyor belt were 8.16 m/min, 20 and 55°, respectively. Under this combination of parameters, the qualified rate of seed filling, distance between sugarcane segments and deflection angle of sugarcane segments were 95.4%, 99.4% and 96.3%, all of which met the agronomic requirements.

Key words: sugarcane transversal planter; seeder; pre-cut seed type

0　引言

我国是甘蔗种植大国，主要分布在广西、广东、云南和海南等地区，广西甘蔗机械化种植率约为 66.25%[1]，主要为实时切种种植和预切种式种植[2]。其中，实时切种种植技术需要人工将整秆甘

收稿日期：2024-10-24　修回日期：2024-12-19
基金项目：国家自然科学基金项目(52165009)和广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA220021)
作者简介：麻芳兰(1976—)，女，教授，博士，主要从事甘蔗生产机械化智能化研究，E-mail：lan_mfl@163.com

蔗送入切种机喂料口，由机器进行实时切种并播种[3]。此方法易造成蔗种损伤，进而导致出芽率低、用种量高[4]。预切种式甘蔗种植机（即蔗段种植机）将提前切好的蔗段由送种装置和排种装置播至开好的种植沟中，具有伤芽率低、产量高等特点[5]，是当前研究的主流方向。

播种器作为横向摆种蔗段种植机的核心组件，其播种合格率直接影响种植机的作业质量[6]。为了提升播种器效率和均匀度，国内外学者做了诸多研究，如 THIENYAEM 等[7]研制了一种链式预切种式甘蔗种植机，蔗段被放置于漏斗状供种箱，带有凹槽板的链条将蔗段提升后进行排种。TAGHINEZHAD 等[8-9]设计了一种基于电容传感器检测的带式播种装置，通过调节传送带的速度来控制甘蔗的播种速度及播种间距。

目前国内预切种式甘蔗种植机播种器采用夹持式、槽盒式、链条传动式等方式。徐灿等[10]提出指夹式播种装置，由取种夹抛出蔗段完成播种。广西大学[11]提出巢穴式的圆形导轮槽，蔗段随传送链进入播种箱导轮槽后抛出。李尚平等[12-13]设计了一种由转向导流有序集蔗机构和单辊排种器构成的甘蔗预切种播种系统及其补种系统，蔗段通过提升机构送至转向导流集蔗机构，转向直板的倾斜角度使蔗段滑落时发生碰撞而改变位姿，从而实现有序排种。牛钊君等[14]设计了一种利用电磁激励使蔗段充入种槽内，再通过槽带机构排种的种植机，但田间使用电源多有不便。链式播种器有较好的播种效果，基本能实现精确播种[15-17]。LIU 等[18]研制的种植机采用 PLC 控制联动的供种与播种链传动，播种的稳定性有所提高，但蔗段在传送链间转换的问题仍有改进空间。

横向摆种蔗段种植机播种过程蔗段的无序情况会影响到充排种的流畅性[19]，现有蔗段输送装置虽能够调整蔗段的有序性，但蔗段输送过程中因挤压、摩擦导致的伤种、漏种、重播甚至堵塞的情况常有发生。针对此类问题，本文设计一种带有隔板的传送带式预切种甘蔗横向播种器。通过对播种器运动状态及充种过程仿真分析，结合试验平台研究播种器传送带速度、传送带倾角、集蔗箱底部折角和留存蔗段数量等因素对充种合格率的影响，并进行性能验证试验。

1　蔗段播种器结构优化设计

1.1　甘蔗种植农艺要求

双芽段蔗种横向种植技术是当前推广应用的种植技术，具有发芽率高、抗倒伏能力强等特点[20]。蔗芽的增多和蔗种土壤空间的增加可提高甘蔗发芽数，种植密度增加能够提升甘蔗种植效率，甘蔗的产糖量、产量和抗倒伏能力也均有增加[21]。

双芽段蔗种的物理特性也是甘蔗种植机播种器设计时需要考虑的因素之一。选取 200 根中蔗 9 号双芽段蔗种，长度分布在 260 ~ 350 mm 之间，蔗段直径在 32 ~ 40 mm 之间的占 97.5%。

1.2　现有播种器分析

对链式播种器不同的充排种结构进行探讨研究，在这些结构中，蔗段的自动充槽阶段主要依靠蔗段自身重力及相互挤压入槽。此方式虽然可以实现精准排种，但易出现卡蔗、堵塞等情况。

两级传送链式播种器结构如图 1 所示，充种链负责在集蔗箱内带动甘蔗入槽，甘蔗从充种链抛出，再由排种链承接来自充种链的蔗段，并将蔗段从高处运输到低处抛出。

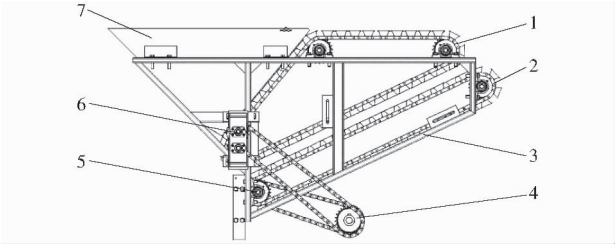

图 1　两级传送链式播种器结构示意图

Fig. 1　Schematic of seeder with two-stage transmission chains

1. 充种链　2. 排种链　3. 机架　4. 动力轴　5、6. 输入轴　7. 集蔗箱

该结构的关键在于两级传送链的相互配合。由于受自身重力、链条松边等影响，链条会出现下垂现象，此现象在排种链满载蔗段时尤为明显。同时为防止种植机运行过程因振动等原因导致蔗段于蔗槽中掉落，故两级传送链之间的间距较小。当蔗段从充种链向排种链转换时，未顺利充入排种链蔗槽的蔗段会发生堆积现象，从而在两条传送链间发生卡蔗现象，进而影响种植合格率。

为了避免蔗种堆积、卡蔗等现象，对播种器的充种和排种模式进行了改进，如图 2 所示。改进后的播种器其排种链采用竖直布置，由于传送过程减少了排种链自身重力及蔗段的影响，从而避免了由于链条下垂导致的卡种、漏种等问题。

改进后的播种器在田间工作时，由于地势起伏、机身抖动等原因，蔗段掉入排种链后发生跳动，易出现落种位置偏离蔗槽、漏种等现象。由于蔗段无法准确充入排种链的蔗槽中，从而直接影响了种植机的作业质量。

此外，上述两种链式播种器的蔗槽均设计为宽

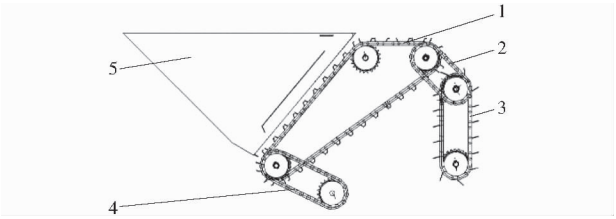

图 2 改进后播种器结构示意图

Fig. 2 Schematic of improved seeder structure

1. 充种链 2. 传动链 3. 排种链 4. 动力输入链 5. 集蔗箱

顶窄底,如图 3 所示。此结构有利于蔗段入槽,但试验中发现,由于蔗槽上口过宽,蔗段容易在蔗槽上端产生堆积。其次,由于蔗槽安装在传送链上,蔗槽间存在一定间距,蔗段亦会在此间距之间产生堆积,极端情况下,蔗段会卡在蔗槽之间并损坏蔗槽。

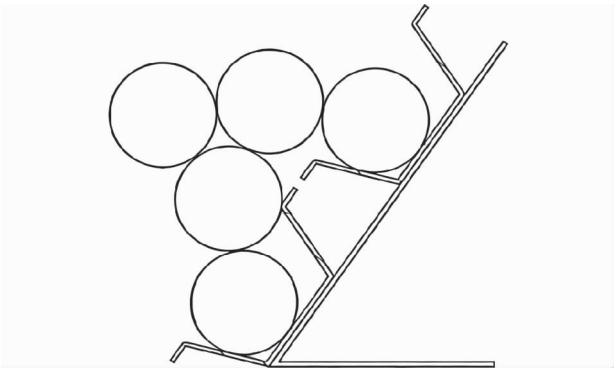

图 3 蔗段堆积示意图

Fig. 3 Schematic of stackied sugarcane segments

综上可知,两级传送链式播种器由于自身重力及蔗段的影响,传送过程蔗段在两级链条间的转换存在卡蔗、漏种等现象,影响播种合格率。

1.3 播种器设计方案

针对上述问题及播种器性能要求,对链式播种器进行了结构优化设计,优化后的播种器主要由集蔗箱、辊轮组(换向辊轮、动力滚轮、支撑回转滚轮)以及装有橡胶挡板的橡胶传送带组成(图 4)。传送过程蔗段充入蔗槽后与传送带保持相对静止,直至从传送带抛出。因此,为了确保播种器的播种合格率和落种高度,只需考虑播种器的充种情况及蔗段抛出后的运动情况。

播种器由一个完整的回转橡胶传送带构成,在 *AB* 段自行完成充种的蔗段随传送带沿着 *BC* 段运输至 *CD* 段,最终到达点 *D*,达到落种高度后抛入种植沟中从而完成播种过程,传送带再经过回转辊回到点 *A* 处,如图 5 所示。

1.4 蔗槽及传送带设计

1.4.1 蔗槽设计

根据甘蔗截面近似圆形的物理特性,设计的蔗槽由两块高温熔融在橡胶传送带上的隔板形成(图 6)。由于中蔗 9 号双芽段蔗种的直径主要分布

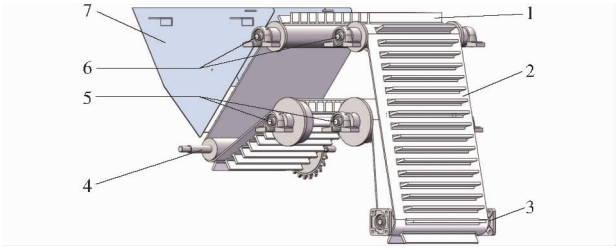

图 4 隔板带式播种器结构示意图

Fig. 4 Schematic of conveyor belt seeder with partition

1. 橡胶挡片 2. 橡胶传送带 3、6. 换向辊筒 4. 主动辊筒 5. 支撑回转辊筒 7. 集蔗箱

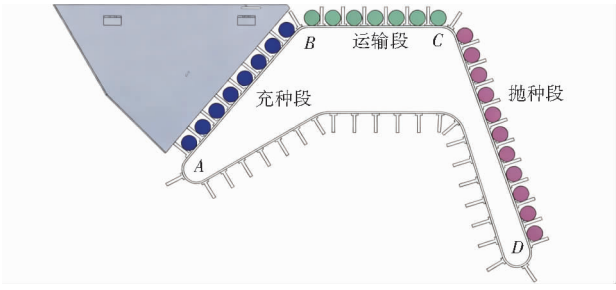

图 5 甘蔗物流示意图

Fig. 5 Schematic of sugarcane logistics

在 30 ~ 40 mm 之间,因此为了能容纳大部分的蔗段,传送带隔板间形成的空间设计为宽 40 mm,高 40 mm。

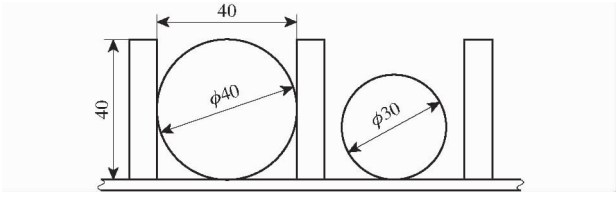

图 6 隔板蔗槽结构参数示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the structural parameters of the sugarcane trough with partitions

1.4.2 传送带设计

传送带采用柔软且刚度小、抗腐蚀能力较强的 PVC 橡胶,周长 3 000 mm,宽 440 mm,厚 3 mm,结构为二布二胶,采用高温齿形接驳。传送带加装直隔板,隔板长 340 mm,高 40 mm,厚 8 mm,如图 7 所示。传送带两边留出 50 mm 的边条,目的是为回转支撑轮提供支撑路径,便于传送带回转。

1.4.3 甘蔗在传送带中的物流过程

蔗段在点 *C* 处从水平运动转为向下运动,此过程运动方向发生改变,如图 8 所示。

若蔗段在点 *C* 处开始平抛运动,有运动学方程

$$S_1 = R(1 - \cos 50°) = \frac{1}{2} g t_1^2 \tag{1}$$

$$S_2 = R\cos 50° = v t_1 \tag{2}$$

式中 S_1——竖直方向位移,mm

S_2——水平方向位移,mm

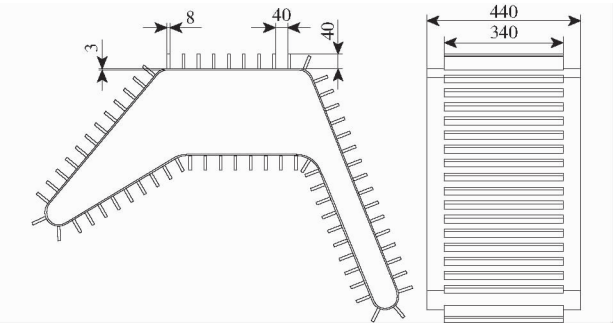

图 7　传送带结构参数设计图

Fig. 7　Design of conveyor belt structural parameters

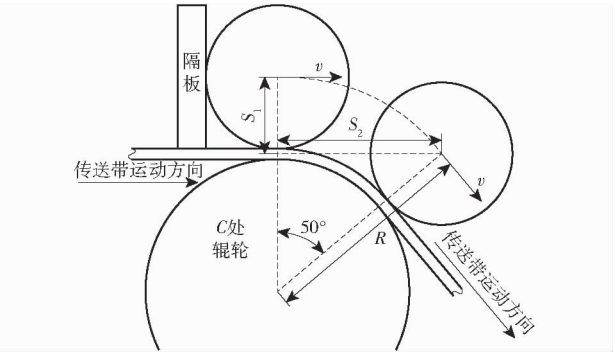

图 8　蔗段在点 C 处运动示意图

Fig. 8　Movement diagram of sugarcane seed at C

t_1——蔗段掉落时间，s

g——重力加速度，m/s^2

R——甘蔗运动半径，mm

v——甘蔗速度，m/s

辊轮轴线到蔗段轴线的距离 R 为 60 mm。通过式(1)、(2)求得 H_1 为 21.43 mm，X_1 为 45.96 mm。可得 $t_1=0.066$ s，$v=0.696$ m/s。若要使蔗段从点 C 处抛离传送带，则带速应大于 41.76 m/min。本文所选传送带速度皆小于此速度，故蔗段从 BC 段运输至 CD 段时不会从点 C 处抛出。

对蔗段在点 D 抛出掉入种植沟槽的运动状态进行分析，如图 9 所示。

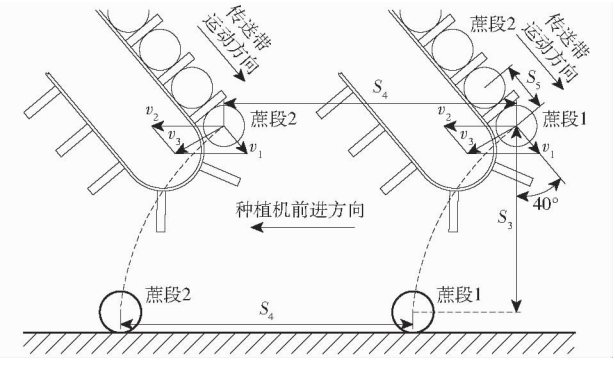

图 9　甘蔗抛种运动过程示意图

Fig. 9　Schematic diagram of the sugarcane seed throwing movement process

蔗段抛出蔗槽的瞬间，蔗段以传送带速度 v_1 和种植机前进速度 v_2 的合成速度 v_3 抛出并做自由落体运动，直到蔗段掉入种植沟槽中。传送带速度方向与竖直方向的夹角为 40°。有运动学方程

$$S_3=v_1t_2\cos40°+\frac{1}{2}gt_2^2 \tag{3}$$

式中　S_3——竖直方向位移，mm

t_2——蔗段掉落时间，s

蔗段抛出点距离水平地面高度 S_3 为 400 mm，g 取 9.8 m/s^2。将不同的传送带速度代入式(3)中即可求出对应的蔗段落地时间。

图 9 中，种植机每行进距离 S_4，传送带蔗段应行进一个蔗槽和隔板的间距 S_5。种植机在两根蔗段斜抛进入种植沟间行进的距离 S_4 应满足农业参数要求，即播种的蔗段间距 S_4 为 330 ~ 490 mm。传送带每两根蔗段的间距 S_5 为 48 mm。则有

$$S_4=v_2t_3 \tag{4}$$

$$S_5=v_1t_3 \tag{5}$$

式中　t_3——蔗段在传送带上运行 S_5 所需要的时间，s

将不同的传送带速度代入式(4)，可计算出在满足农业参数条件下，种植机车速与传送带速度适配的区间，如表 1 所示。

表 1　种植机车速和传送带速度

Tab. 1　Speeds of planter and conveyor

传送带速度/(m·min^{-1})	种植机车速/(m·s^{-1})
5.94	0.68 ~ 1.01
8.16	1.10 ~ 1.63
10.00	1.15 ~ 1.70
12.16	1.39 ~ 2.07
16.21	1.85 ~ 2.75

1.5　集蔗箱设计

蔗箱和蔗槽的结构会影响蔗段充种合格率，而倒三角型的蔗箱有较好的储蔗能力和充种效果。根据蔗段的物理性质、几何要求及课题组现有研究[17-18]，本文仍选用倒三角形蔗箱，如图 10a 所示。为了提高传送带有效率及充种率，集蔗箱底板一侧被切割掉一小部分(图 10a 中红框)，使传送带能伸入集蔗箱一段距离，减少传送带侧面空隙(图 10b 红框)，防止已经入槽的蔗段从传送带与集蔗箱之

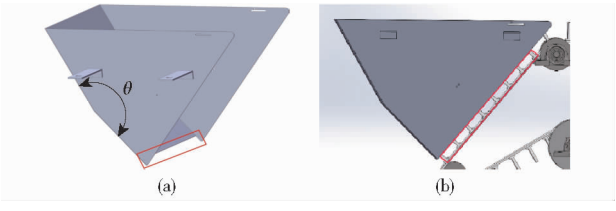

图 10　集蔗箱

Fig. 10　Sugarcane box

间的侧面空隙掉落。

根据课题组前期研究,集蔗箱底部折角的角度 θ 应大于 11.9°[22]。θ 具体取值可通过仿真分析来确定,以探究其角度变化是否对充种率有影响,并确定其最优值。

2 基于 ADAMS 的播种器仿真试验优化

2.1 播种器仿真模型与方案

2.1.1 ADAMS 仿真建模

由于蔗段从集蔗箱中充入传送带蔗槽的过程直接影响充种合格率,因此本文重点探究充种过程。使用 Solidworks 生成由传送带充种段、集蔗箱以及若干蔗段构成的仿真模型并导入 ADAMS 中,结果如图 11 所示。

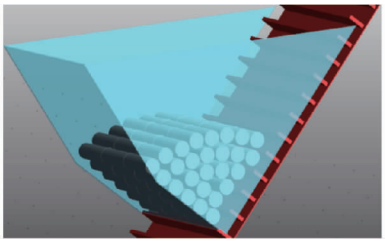

图 11 基于 ADAMS 的仿真模型

Fig. 11 Simulation model in ADAMS

2.1.2 仿真试验方案

固定集蔗箱底部折角为 140°,传送带倾角为 50°,设置 5 个不同传送带速度,如表 2 所示,传送带速度和主动辊转速一一对应,研究传送带速度对播种器性能的影响。

表 2 传送带速度试验水平

Tab. 2 Test levels of conveyor speed

水平	传送带速度/(m·min^{-1})	主动辊轮转速/(r·min^{-1})
1	5.94	22.6
2	8.16	30.3
3	10.00	37.2
4	12.16	45.3
5	16.21	52.2

固定传送带速度为 10.00 m/min 和集蔗箱底部折角为 140°,设置 30°、40°、50°、60°、70° 5 个不同水平的传送带倾角,研究传送带倾角对播种器性能的影响。

固定传送带速度为 10.00 m/min 和传送带倾角为 50°,设置 140°、160°、180° 3 个不同水平的集蔗箱底部折角,研究集蔗箱底部折角对播种器性能的影响。

2.2 仿真试验结果和分析

2.2.1 不同传送带速度的充种过程分析

图 12a、12b 是传送带速度分别为 5.94、8.16 m/min 某时刻的仿真试验结果。当传送带速度较小时,蔗段有充足的时间依次有序地充入蔗槽中,充种效果良好,未发生甘蔗乱序和堆积现象。

图 12c 是传送带速度为 10.00 m/min、仿真进程 2.67 s 时的仿真试验情况。随着传送带速度加快,蔗段间的碰撞挤压变得剧烈,蔗槽出现了漏充现象,充种合格率有所下降。

如图 12d、12e 所示,当传送带速度继续加快,蔗段在集蔗箱内发生打横现象,蔗段由于卡在传送带上从而造成漏充。主要原因在于传送带速度过快时,蔗段仅依靠自身惯性难以及时充种,从而产生漏充和乱序现象。

如图 12f 所示,当传送带速度提高至 25 m/min 时,传送带上的蔗段在集蔗箱底部发生乱序卡种现象,导致连续、大面积漏种。在多个连续蔗槽中出现漏种情况时,只有卡在集蔗箱内的蔗段掉落后,剩下的蔗段才能依次充入蔗槽。

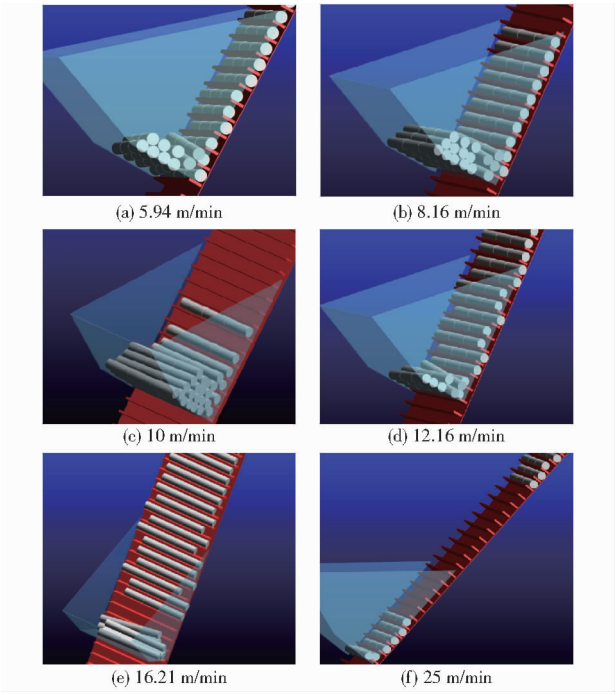

图 12 不同传送带速度时仿真结果

Fig. 12 Simulation results of different belt speeds

由仿真试验结果可知,传送带速度较小时,集蔗箱内的蔗段秩序较好,相对运动稳定,能有序充入蔗槽中完成充种,充种效果良好。随着传送带速度增加,蔗段乱序情况增多,集蔗箱内出现打横卡蔗现象,传送带蔗槽中出现漏种情况。

综上,传送带速度较小时充种情况较好,传送带速度较大时,漏种、堆积现象明显。

2.2.2 不同传送带倾角的充种过程分析

图 13a 中传送带倾角为 30°,由于传送带过于平缓,蔗段会发生堆积现象。图 13b 中传送带倾角

为 40°，堆积的蔗段跟随传送带向上运动后又掉回集蔗箱中，造成集蔗箱内的蔗段乱序，从而出现漏充。

图 13c 中传送带倾角为 50°。25 根蔗段整齐有序地充入蔗槽中，没有堆积漏充现象发生，充种效果较好。传送带倾角继续增加能明显观察到集蔗箱底部蔗段的秩序较乱，而当倾角进一步倾斜到 70°时，集蔗箱底部空间变小，蔗段之间的挤压增大，仿真进程 24.3 s 时出现蔗段打横现象，如图 13d 所示。

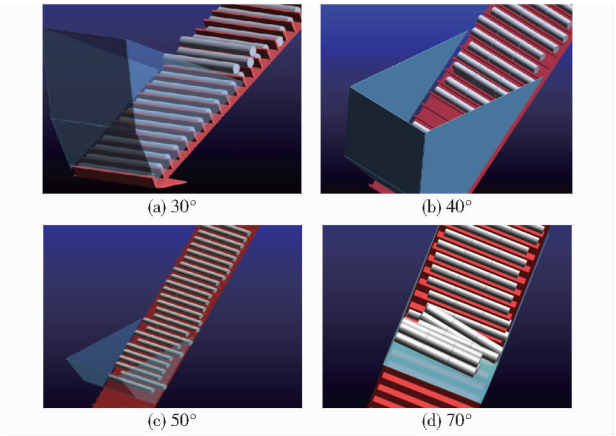

图 13　不同传送带倾角时仿真结果

Fig. 13　Simulation results of different conveyor angles

综上，当传送带倾角过小时，易出现蔗段堆积现象；传送带倾角过大时，集蔗箱底部空间变小，蔗段相互之间的挤压、冲击加大，亦不利于充种的稳定，因此传送带倾角选择 50°左右较好。

2.2.3　不同集蔗箱底部折角 β 的充种过程分析

不同集蔗箱底部折角 β 对充种性能影响结果如表 3 所示，由表中数据可知 β 对充种效果影响并不显著。因此，后续试验将不考虑集蔗箱底部折角对充种合格率的影响。

表 3　不同集蔗箱底部折角 β 仿真结果

Tab. 3　Simulation results of different angle β at the bottom of the sugarcane collection box

β/(°)	堆积数/根	漏充数/根
140	0	1
160	0	2
180	0	1

2.2.4　蔗段运动和受力分析

设置传送带速度为 10.00 m/min，传送带倾角 50°，仿真时长 50 s，分析蔗段的运动过程。选取集蔗箱最顶层 4 根蔗段，其运动速度曲线如图 14 所示。

当仿真开始时蔗段速度、加速度急剧增大，蔗段之间碰撞后速度、加速度出现阶段性起伏变化，符合蔗段在集蔗箱内的碰撞规律。

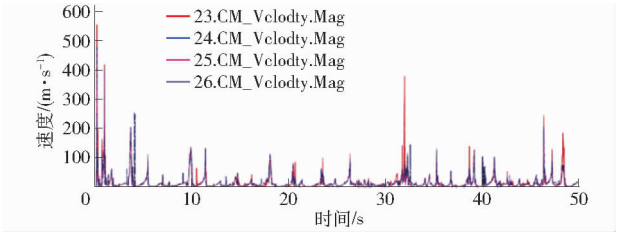

图 14　蔗段在充种段运动速度曲线

Fig. 14　Speed curves of sugarcane segment in filling section

如图 15 所示，作用在 4 根蔗段的接触力主要分布在 5 ~ 15 N 之间，蔗段发生碰撞时，最大接触力为 19.6 N，由此可知充种过程碰撞对蔗段和蔗芽的损伤较小。

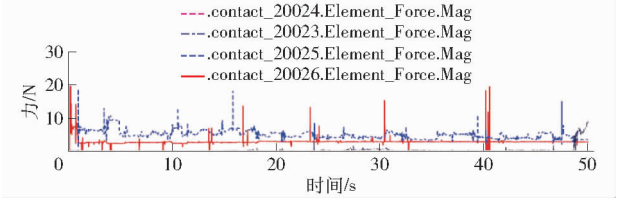

图 15　蔗段在充种段的受力变化曲线

Fig. 15　Force change curves of sugarcane segments in filling section

3　播种器样机试验

3.1　试验条件和方法

3.1.1　试验样机

横向摆种蔗段种植机播种器样机如图 16 所示，播种器主动辊筒由带减速器的电机驱动，换向辊筒、支撑辊轮和减速电机安装在铝合金台架上。集蔗箱蔗段设计容量为 120 根、传送带角度为 50°、底部折角 135°。使用双芽段蔗种，长度在 280 ~ 320 mm 之间，直径均大于 30 mm。

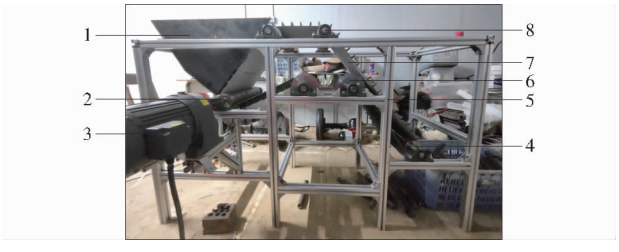

图 16　播种器样机

Fig. 16　Seeder prototype

1. 集蔗箱　2. 主动辊筒　3. 减速电机　4. 换向辊筒　5. 试验机架　6. 支撑辊轮　7. 橡胶传送带　8. 从动辊轮

3.1.2　试验蔗段制备

试验采用中蔗 9 号、桂糖 41 号双芽段蔗种，长度分别为 250、270、290、310、330 mm 的蔗段，蔗段长度对充种合格率的影响规律如图 17 所示。由图 17 可知，蔗段长度为 250 mm 时，由于较短的蔗段会互相叠加，易出现一端在蔗槽内一端靠在隔板上，从而

导致连续漏种,充种效果不理想。蔗段长度为 280、300 mm 时,蔗段充种率平均值大于 95%,因此蔗段长度应控制在 300 mm 左右。此外,当蔗段直径小于 25 mm 时,蔗段容易从集蔗箱底部与传送带之间的缝隙中掉落。

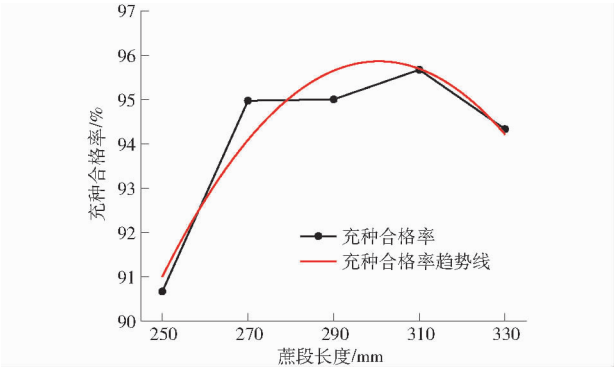

图 17 蔗段长度对充种合格率的影响曲线

Fig. 17 Influence curves of sugarcane length on qualified rate of filling

根据双芽蔗段的长度,为保证每根蔗段都有两个蔗芽,试验研究过程将蔗段长度裁切为 280 ~ 320 mm,直径均大于 30 mm。

3.1.3 试验内容

针对传送带速度、集蔗箱蔗段数和传送带倾角分别进行试验研究,安装摄影设备记录试验过程,对试验数据进行分析处理,得出不同因素对播种器充种性能的影响。

3.2 传送带速度单因素试验

以人工放种方式模拟供种系统,维持集蔗箱蔗段数在 20 根左右,固定传送带倾角为 50°,设置传送带速度 5.94、8.16、10.00、12.16、16.21 m/min 共 5 个试验水平。

试验结果见图 18,当传送带速度为 16.21 m/min 时,充种合格率最低,为 92.7%。当传送带速度为 10.00 m/min 时,充种合格率最高,为 98.7%,样机试验结果与仿真试验结果基本一致。

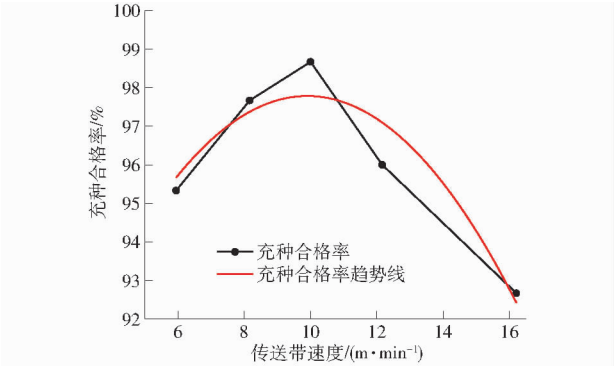

图 18 传送带速度对充种合格率的影响曲线

Fig. 18 Influence curves of conveyer speed on qualified rate of filling

当传送带速度为 5.94 m/min 时,集蔗箱内蔗段运动和充种情况整齐有序,蔗段提升效果较好。传送带速度增大时,充种情况与仿真试验中传送带速度较大时情况一致。蔗段之间相互作用力变大,碰撞后蔗段更易乱序,蔗段打横导致漏种现象增多,如图 19 所示。

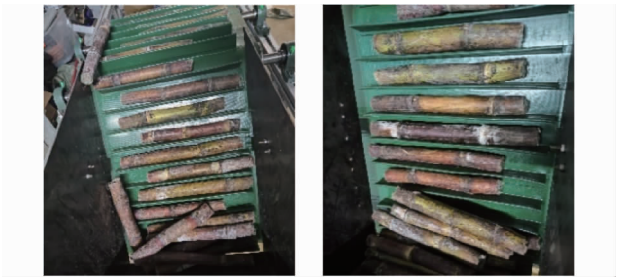

图 19 蔗段打横乱序现象

Fig. 19 Cane seed horizontal disorder phenomenon

由传送带速度方差分析结果(表 4)可知,$F = 6.513 > F_{0.01} = 3.48$,$P = 0.0035 < 0.01$,故传送带速度对充种合格率有极显著影响。

表 4 传送带速度对充种合格率影响的方差分析

Tab. 4 Variance analysis on the influence of the conveyor belt speed on the seed filling qualification rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
组内	64.267	4	16.067	6.513	0.0035
组间	24.667	10	2.467		
合计	88.933	14			

3.3 集蔗箱蔗段数单因素试验

固定传送带速度为 8.16 m/min,传送带倾角为 50°,集蔗箱蔗段数设置 10、20、30、40、50 根共 5 个试验水平。

试验结果如图 20 所示,播种器充种合格率随着集蔗箱蔗段数的增加而降低,当集蔗箱蔗段数为 10 根时,充种合格率最高,为 98.3%。当集蔗箱蔗段数依次增大时,充种合格率逐渐减小,当集蔗箱蔗段数为 50 根时,出现大面积漏种,充种率为 90%。

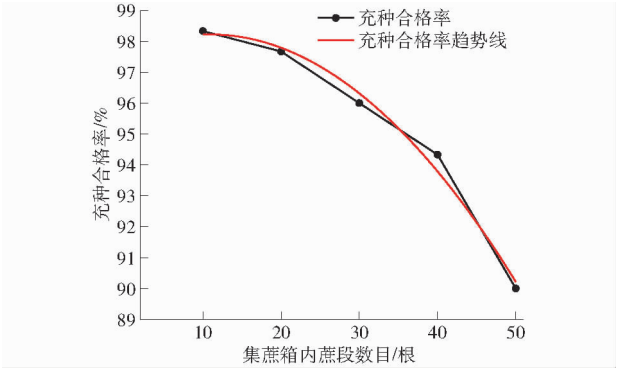

图 20 集蔗箱蔗段数对充种合格率的影响曲线

Fig. 20 Influence curves of number of sugarcane segments in box on qualified rate of seed filling

集蔗箱蔗段数较少时，蔗段之间的挤压力较小，蔗段在集蔗箱内的运动整齐有序，充种情况良好。随着集蔗箱蔗段数增加，准备入槽的蔗段与上层蔗段产生较大的挤压和摩擦，上层蔗段的重力全部作用在最底层蔗段上，使最底层蔗段充种变得困难。当集蔗箱蔗段增多至一定数量时，蔗段出现打横现象，乱序的蔗段阻挡后续蔗段的充槽，造成大面积蔗槽漏种。种箱内留存蔗段在 30 根以下时，播种器平均充种率达 97.3%，充种效果较好。

由集蔗箱蔗段数方差分析结果（表 5）可知，$F = 10.236 > F_{0.01} = 3.48$，$P = 0.001 < 0.01$，故集蔗箱蔗段数对播种合格率有极显著影响。

表 5　集蔗箱蔗段数对充种合格率影响的方差分析

Tab. 5　Variance analysis on the influence of the number of sugarcane seed in the suger cane collection box on the seed filling qualification rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
组内	144.667	4	36.167	10.236	0.001
组间	35.333	10	3.533		
合计	180.000	14			

3.4　传送带倾角单因素试验

固定传送带速度为 8.16 m/min，人工持续放种维持种箱内留存蔗段数为 20 根，传送带倾角设置 40°、45°、50°、55°、60°共 5 个试验水平。试验结果如图 21 所示，充种合格率随着传送带倾角的增加而先增加后降低，传送带倾角取值在 50°～55°之间时，充种合格率最高达 96.7%，与仿真试验结果基本一致。

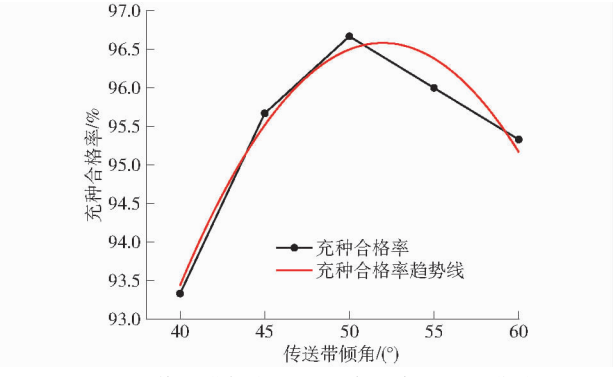

图 21　传送带倾角对充种合格率的影响曲线

Fig. 21　Influence curves of belt inclination angle on qualified rate of seed filling

传送带倾角为 40°时，传送带较为平缓，甘蔗在传送带上容易产生堆积，充种合格率较低，为 93.3%；当传送带倾角增加到 50°时，传送带逐渐陡峭，蔗段的堆积逐渐减少。传送带倾角继续增大时，集蔗箱底部空间变窄，蔗段之间的碰撞增加，集蔗箱内蔗段乱序的情况增加，传送带开始出现连续漏种现象，当传送带倾角为 60°时，平均漏种率为 5%。

由此可知选择适当的传送带倾角，可减少种箱内蔗段出现的乱序情况，稳定蔗段的充槽节奏，有效提高播种器的充种率。从试验结果可知，传送带的倾斜角度置于 50°～55°时，播种器充种效果较好，合格率为 96.3%。

对传送带倾角与充种合格率进行方差分析，结果如表 6 所示，$F = 3.524 > F_{0.05} = 3.48$，$P = 0.034 \leqslant 0.05$，由此可知传送带倾角对播种器充种合格率有显著影响。

表 6　传送带倾角对充种合格率影响的方差分析

Tab. 6　Variance analysis on the influence of the angle of the conveyor belt on the seed filling qualification rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
组内	19.73	4	4.93	3.524	0.034
组间	14.00	10	1.4		
合计	33.73	14			

3.5　正交试验

选择传送带速度、集蔗箱蔗段数、传送带倾角作为正交试验因素进行三因素五水平的正交试验。试验使用 $L_{25}(5^6)$ 正交表，因素水平如表 7 所示，试验结果如表 8 所示（A、B、C 为因素水平值）。

表 7　正交试验因素水平

Tab. 7　Orthogonal experimental factors levels

水平	传送带速度/(m·min^{-1})	集蔗箱蔗段数/根	传送带倾角/(°)
1	5.94	10	40
2	8.16	20	45
3	10.00	30	50
4	12.16	40	55
5	16.21	50	60

对表 8 中的试验数据进行极差分析，结果如表 9 所示。集蔗箱蔗段数 B 的极差最大，传送带速度 A 次之，传送带倾角 C 最小，故 3 个因素的主次顺序为 $B > A > C$，最优参数组合为 $B_2A_2C_4$，即集蔗箱蔗段数 B 为 20 根，传送带速度 A 为 8.16 m/min，传送带倾角 C 为 55°。

对试验数据进行方差分析，结果如表 10 所示。传送带速度 A 和集蔗箱留存蔗段数 B 的 P 值均小于 0.01，对播种器充种合格率影响极显著；传送带倾角 C 的 P 值为 0.022（<0.05），对播种器充种合格率影响显著，与单因素试验结果一致。

3.6　室内验证试验

带有刻度线的气泡垫放置于落种点下方，气泡垫能缓解甘蔗落地时的跳动情况，方便观察和记录落种距离。采用高速摄像机拍摄记录蔗段落种过程，后期根据慢动作视频确定甘蔗的落点。对蔗段的落点分布进行统计，选择每根蔗段落地瞬间最靠

表 8 正交试验结果

Tab. 8 Orthogonal test results

试验号	试验因素						合格率/%			
	A	B	C	空列	空列	空列	试验 1	试验 2	试验 3	均值
1	1	1	1	1	1	1	93	92	95	93.3
2	1	2	2	2	2	2	93	94	96	94.3
3	1	3	3	3	3	3	95	96	95	95.3
4	1	4	4	4	4	4	93	95	93	93.7
5	1	5	5	5	5	5	91	90	89	90.0
6	2	1	2	3	4	5	95	95	94	94.7
7	2	2	3	4	5	1	95	96	94	95.0
8	2	3	4	5	1	2	95	97	95	95.7
9	2	4	5	1	2	3	92	92	93	92.3
10	2	5	1	2	3	4	91	89	90	90.0
11	3	1	3	5	2	4	91	92	94	92.3
12	3	2	4	1	3	5	94	96	94	94.7
13	3	3	5	2	4	1	95	94	93	94.0
14	3	4	1	3	5	2	91	92	89	90.7
15	3	5	2	4	1	3	86	85	89	86.7
16	4	1	4	2	5	3	93	93	92	92.7
17	4	2	5	3	1	4	93	94	94	93.7
18	4	3	1	4	2	5	91	90	89	90.0
19	4	4	2	5	3	1	90	88	91	89.7
20	4	5	3	1	4	2	86	87	88	87.0
21	5	1	5	4	3	2	92	91	92	91.7
22	5	2	1	5	4	3	91	91	90	90.7
23	5	3	2	1	5	4	89	90	89	89.3
24	5	4	3	2	1	5	86	85	87	86.0
25	5	5	4	3	2	1	88	87	87	87.3

表 9 极差分析

Tab. 9 Range analysis results

参数	A	B	C	空列	空列	空列
k_1	466.7	464.7	454.7	456.7	455.3	459.3
k_2	467.7	468.3	454.7	457.0	456.3	459.3
k_3	458.3	464.3	455.7	461.7	461.3	457.7
k_4	453.0	452.3	464.0	457.0	460.0	459.0
k_5	445.0	441.0	461.7	458.3	457.7	455.3
$\overline{K}_1$	93.3	92.9	90.9	91.3	91.1	91.9
$\overline{K}_2$	93.5	93.7	90.9	91.4	91.3	91.9
$\overline{K}_3$	91.7	92.9	91.1	92.3	92.3	91.5
$\overline{K}_4$	90.6	90.5	92.8	91.4	92.0	91.8
$\overline{K}_5$	89.0	88.2	92.3	91.7	91.5	91.1
R	4.5	5.5	1.9	1.0	1.2	0.8

表 10 方差分析

Tab. 10 Variance analysis results of qualified rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P	$F_{0.05}$
A	72.52	4	18.13	20.16	0.000	3.26
B	102.47	4	25.62	28.49	0.000	3.26
C	15.40	4	3.85	4.28	0.022	3.26
误差	10.79	12	0.90			
合计	201.18	24				

近的整数刻度为试验数据，并记录甘蔗落地时的偏转情况，如图 22 所示。



图 22 室内验证试验

Fig. 22 Laboratory experiment

试验指标有落种距离合格率、落种偏转角度合格率和充种合格率。试验条件：传送带速度为 8.16 m/min，集蔗箱蔗段数为 20 根，传送带倾角为 55°。试验结果显示，落种距离合格率为 99.4%、落种偏转角合格率为 96.4%、充种合格率为 95.4%，各指标均符合预期效果和农艺要求。

4 结论

（1）根据甘蔗横向种植农艺要求和对现有横向摆种蔗段种植机的分析，设计了一种橡胶传送带集成隔板形成蔗槽的双芽蔗段横向摆种甘蔗播种器，优化了蔗段在播种器中的物流过程。通过对播种器进行运动学和动力学仿真分析，确定了影响充种性能的因素有传送带速度、集蔗箱蔗段数和传送带倾角，播种器与蔗段的最大接触力仅为 19.6 N，对蔗段及蔗芽的损伤较小。

（2）单因素试验结果表明，当集蔗箱蔗段数为 10 根时播种器充种合格率最高，为 98.3%，在传送带速度为 10.00 m/min 时充种合格率最高，为 98.7%，在传送带倾角为 50°时合格率最高，为 96.7%，有较好的充种效果。

（3）正交试验结果表明，传送带速度、集蔗箱蔗段数量对充种合格率有极显著影响，传送带倾角对充种合格率有显著影响。影响充种合格率的主次因素为集蔗箱蔗段数、传送带速度、传送带倾角。最优参数组合是：传送带速度为 8.16 m/min，集蔗箱蔗段数为 20 根，传送带倾角为 55°。

（4）验证试验结果表明，采用最佳参数组合的播种器能满足横向摆种蔗段的要求，播种器的充种合格率 95.4%、甘蔗落种间距分布在满足农艺要求范围的有 99.4%；蔗段偏转角度的合格率为 96.4%，各项指标均符合农艺要求。

参 考 文 献

[1] 张彦标. 广西甘蔗生产全程机械化推广的现状与优化路径探析[J]. 农村科学实验, 2024(7): 64-66.

[2] 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(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(5): 52 - 58. (in Chinese)
[3] 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)
[4] 李武. 甘蔗机械化种植存在的问题及对策[J]. 农村科学实验,2024(11):70 - 72.
[5] 黄岳中. 浅谈甘蔗种植机械化技术的应用[J]. 中外食品工业,2024(9):58 - 60.
[6] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
[7] THIENYAEM T, SAENGPRACHATANARUG K, UENO M, et al. Analysis of discharge consistency and performance of a sugarcane billet planter with side-conveyer concept[J]. KKU Engineering Journal, 2016, 43(1): 9 - 12.
[8] TAGHINEZHAD J, ALIMARDANI R, JAFARI A. Design a capacitive sensor for rapid monitoring of seed rate of sugarcane planter[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2013, 4(15): 23 - 29.
[9] TAGHINEZHAD J, ALIMARDANI R, JAFARU A. Optimization cane traction output from hopper in full-automatic sugarcane planters by using response surface modeling and analytical hierarchy process[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2013, 2(15): 138 - 147.
[10] 徐灿,刘鹏,孟为国,等. 基于预斩种式甘蔗播种机指夹式播种装置的设计分析[J]. 农业开发与装备, 2016(5): 55 - 56.
[11] 广西大学. 单芽段蔗种排种器:201510198646. X[P]. 2016 - 08 - 17.
[12] 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)
[13] 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)
[14] 牛钊君,刘信鹏,葛畅,等. 甘蔗健康种苗双芽段槽带式种植机排种性能优化研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(8): 142 - 150.
NIU Zhaojun, LIU Xinpeng, GE Chang, et al. Study on seeding performance optimization of sugarcane disease-free seed canes double-bud trough-type planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(8): 142 - 150. (in Chinese)
[15] 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 deed dupply device of pre-cut sugarcane transverse planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 176 - 182. (in Chinese)
[16] MA Fanglan, LIU Tianxiang, LI Shangping, et al. Design and test of transverse transplanter for pre-cut sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 72 - 81. (in Chinese)
[17] 苏微,洪方伟,赖庆辉,等. 预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 87 - 97.
SU Wei, HONG Fangwei, LAI Qinghui, et al. Design and test of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 87 - 97. (in Chinese)
[18] LIU Qingting, ZHU Mojin, WU Tao, et al. Design and testing of a diamond-shaped four-wheeled gantry-like sugarcane cultivator[J]. Sugar Tech., 2021, 23(6): 1413 - 1424.
[19] 李尚平,李洋,张彪,等. 宿根蔗补种机均匀排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 124 - 138.
LI Shangping, LI Yang, ZHANG Biao, et al. Design and experiment on control system of uniform seed seeding of ratoon cane reseeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 124 - 138. (in Chinese)
[20] 罗亚伟,覃振强,梁阗,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)
[21] 刘富成,李照杰,蔡文伟,等. 种植密度和深度对甘蔗产量及抗倒伏的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(2): 330 - 339.
LIU Fucheng, LI Zhaojie, CAI Wenwei, et al. Effects of planting density and depth on yield and lodging resistance in sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(2): 330 - 339. (in Chinese)
[22] 李尚平,张伟,黄宗晓,等. 基于离散元法的自走式甘蔗转运车车厢稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 374 - 382.
LI Shangping, ZHANG Wei, HUANG Zongxiao, et al. Stability of carriages of self-propelled sugarcane transporters based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 374 - 382. (in Chinese)