doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.011

预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验

苏　微　洪方伟　赖庆辉　贾广鑫　陈子威
(昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

摘要: 针对目前预切种式甘蔗排种器普遍存在充种效果差、合格指数低等问题,设计了一种预切种甘蔗勺链式排种器。基于最速降线理论分析和待充蔗种的充种状态分析,阐明了最速降线可提高充种性能的原理;利用 EDEM 软件进行了单因素仿真试验,分析了不同种勺倾角和种勺数量对充种性能的影响。仿真结果表明,当种勺倾角为 30°、种勺数量为 15 个时,充种性能较好;通过台架单因素试验,对种层高度调节装置和隔离板倾角进行了分析,为充种过程提供了有利条件。以作业速度、排种器倾角、种层高度为试验因素,以合格指数、漏充指数、重充指数为试验指标,进行二次回归旋转正交组合试验,分析了各试验因素交互作用对合格指数的影响。结果表明,当种层高度为 360 mm、作业速度为 1.45 ~ 2.37 km/h、排种器倾角为 9.53° ~ 15.15°时,排种器平均合格指数为 95.33%,平均漏充指数和平均重充指数分别为 3.11%、1.56%,满足甘蔗种植要求。

关键词: 甘蔗; 排种器; 勺链式; 预切种
中图分类号: S223.99　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0087-11　　**OSID**:

Design and Test of Pre-cutting and Spoon Seed-metering Device for Sugarcane

SU Wei　HONG Fangwei　LAI Qinghui　JIA Guangxin　CHEN Ziwei
(*Faculty of Agriculture and Food*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of low degree of pre-cutting sugarcane planting machine in China and the problems such as the difficulty of filling-seed process, the serious missed seeds and the easy damage of seeds caused by the poor adaptability of sugarcane seed to seed-metering device with seed spoon, a kind of design and test of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane was designed. The elaboration on the operating principle of the role of seed spoon, downhill line improving the performance of type seed-metering device with seed spoon angle in every part of filling-seed was made, which through theoretical design and dynamic analysis of the structure of the seed spoon, using the steepest descent line and the inclination angle of the seed spoon to increase the filling speed of the seed spoon and improve the filling performance of the seed metering device. The basic parameters of seed spoon were obtained through the calculation of the kinematic analysis of theoretical calculation and filling-seed process in accordance with the physical characteristics within the seed itself. And through the analysis of the seeds of stress state and motion state in the course filling-seed, the basic parameters of seed metering device were obtained. To be specific, the single factor test was conducted through the EDEM discrete element simulation analysis, and the basic parameters of seed metering device were further ascertained by analyzing the influence of different structural parameters to filling-seed. Then the quadratic regression orthogonal rotation combination test was done, which was based on the single factor test. The quadratic regression orthogonal rotation combination test rotation rate of operating speed, seed metering device dip angle and seeds height were taken as the test factors, and the qualified-seeding index, the multiple-seeding index and the miss-seeding index were taken as the test index, the influence of the interaction of each test factor on the qualification rate was analyzed. After optimizing the test

收稿日期: 2020-06-28　修回日期: 2020-07-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(51975265、31960366)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700600-2017YFD0700604)、云南省重大科技专项(2016ZF001、2017ZF001、2018ZC001-3、2018ZC001-4、2018ZC001-5)和云南省高校工程研究中心建设计划项目
作者简介: 苏微(1979—),女,副教授,主要从事农业机械化研究,E-mail: laisubo@163.com
通信作者: 赖庆辉(1980—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

parameters, the qualification rate of the seed-metering device was 95.33%, the miss-seeding index and the multiple-seeding index were 3.11% and 1.56%, the best parameter combination was the seeds height of 360 mm, the operating speed of 1.45 ~ 2.37 km/h, the seed metering device dip angle of 9.53° ~ 15.15°, the relative error between the test verification result and the simulation optimization result matched. The results showed that the pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane could fully meet the sugarcane requirements of planting.

Key words: sugarcane; seed-metering device; spoon type; pre-cutting

0 引言

甘蔗是我国重要的糖料作物。云南省甘蔗种植面积 26 万公顷,位列全国第 2 位,甘蔗种植是农民的重要经济来源。目前,云南省甘蔗种植依旧以人工作业为主,其劳动强度大、生产效率低,迫切需要研发一种适合云南省甘蔗种植农艺的甘蔗种植机[1-5]。根据云南省甘蔗种植地块面积小、配套拖拉机功率小的特点,结合农民在农闲时对蔗种进行砍蔗、优选、浸种、排序等工序,设计一种预切种式排种器,以提高甘蔗出苗率及其种植效率,对实现云南省甘蔗种植机械化具有重要意义。

排种器是种植机的核心部件,目前甘蔗排种器主要分为实时切种式和预切种式两类,其中预切种式排种器具有出苗率高、自动化程度高等优点[6]。

对于预切种式排种器国内外已有大量研究。澳大利亚 Massey Ferguson、P&HBonel 和美国 GESSNER 等公司针对凹板提升式排种器进行了研究,开发并推出了相应的甘蔗种植机,其排种器通过在升运链上设置凹板实现排种,但存在排种不均、漏充重充现象严重、耗种量大等问题[7-9]。为此,国外学者对提升式排种器进行了相关研究和改进,通过增加重力清种机构、改进夹板结构等方式改善了排种器排种效果,但漏充严重的问题依然存在[10-16]。印度 KAMAL KISAN 公司研制了一种辊式排种器,利用排种辊进行充种,其自动化程度高、工作性能较好,但作业速度较低,并且时有堵种现象发生。我国学者针对振动盘式、槽轮式、单辊排种式预切种排种器进行了研究[17-22],取得了较好的排种效果,但仍然存在漏充问题,且机构较为复杂。上述研究的凹板提升式排种器虽然结构简单、排种效率高,但是凹板对蔗种适应性差、待充蔗种乱序,导致排种器工作时充种性能差和易堵塞的问题未能从根本上解决。因此,用种勺取代传统凹板来提高蔗种的适应性,并使待充蔗种有序排列,成为实现蔗种高效排种的关键。

针对云南省甘蔗种植现状及预切种种植机漏充现象严重的问题,设计一种预切种甘蔗勺链式排种器,以期通过优化分析种勺结构来提高排种效果,并通过设置隔离板有效改善排种器乱种现象,从而为甘蔗种植机的设计提供参考依据。

1 整体结构与工作原理

1.1 整机结构

预切种甘蔗勺链式排种器试验台主要由排种器、种层高度调节装置及支架组成,如图 1a 所示。排种器部分主要由角度调节装置、隔离板、主种箱、护种罩、升运链、种勺、清种器组成;种层高度调节装置主要由副种箱和拨种器组成。

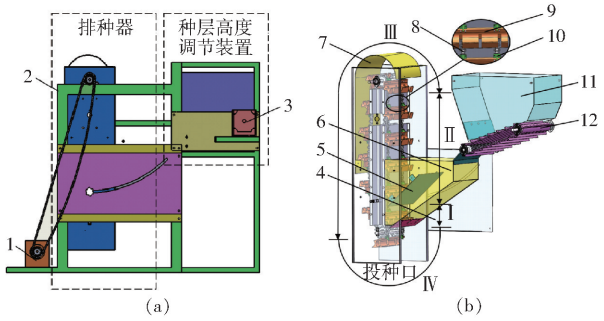


图 1 预切种甘蔗勺链式排种器试验台结构示意图

Fig. 1 Schematics of test stand structure of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane

1. 电机Ⅰ 2. 支架 3. 电机Ⅱ 4. 角度调节装置 5. 隔离板 6. 主种箱 7. 护种罩 8. 升运链 9. 种勺 10. 清种器 11. 副种箱 12. 拨种器 Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 清种区 Ⅲ. 护种区 Ⅳ. 投种区

1.2 工作原理

排种器工作前,将蔗种横向放入主种箱中,升运链在电机Ⅰ提供的动力驱动下转动,带动种勺转动从主种箱中取种,当种勺进入充种区时,蔗种在蔗种间、种箱-蔗种和种勺-蔗种的共同作用下充入种勺,完成充种过程。蔗种在种勺中继续向上运动进入清种区,当种勺中有多根蔗种时,在清种器和机械振动的共同作用下将多余的蔗种清出种勺,清出的蔗种落到主种箱的隔离板上,完成清种过程。蔗种继续随种勺运动,在护种罩的作用下通过护种区进入投种口,蔗种依靠自身重力掉落,完成投种过程。

2 关键部件参数设计

2.1 种勺

预切种甘蔗勺链式排种器主要通过种勺从种

群中分离蔗种，因此种勺是该排种器的重要工作部件。

2.1.1 结构参数

种勺的结构参数取决于蔗种的尺寸。本文选择云南省种植面积最大的“新台糖 22 号”蔗种作为研究对象。根据在甘蔗种植过程中需保证每根蔗种上留有 2 个或 3 个种芽的农艺要求，选择 100 个蔗种进行测量，经统计，蔗种的直径为 24 ~ 36 mm，长度为 298 ~ 342 mm。为此，种勺结构应满足

$$\begin{cases} 0.5d < r < d \\ C > L \\ H > 0.5d \end{cases} \tag{1}$$

式中　r——种勺半径，mm

d——蔗种直径，mm

C——种勺长度，mm

L——蔗种长度，mm

H——种勺深度，mm

结合蔗种尺寸，经计算，取种勺半径为 22.5 mm，种勺深度为 20 mm，种勺长度为 400 mm。

2.1.2 边界曲线

在充种过程中，为使蔗种稳定且高效地充入种勺，种勺边界曲线选择最速降线进行分析[23]。

以种勺内蔗种为研究对象，建立空间坐标系并对其进行受力分析，简化蔗种沿着种勺边界进入种勺的曲线为抛物线，如图 2b 所示，设抛物线方程为 $z = tx^2$，研究蔗种在 xOz 平面内的运动状态，受力分析为

$$\begin{cases} mg\cos\beta = F_N \\ F_f = F_N\tan\varphi \end{cases} \tag{2}$$

式中　β——曲线在滑落点切线夹角，(°)

φ——蔗种与种勺间摩擦角，(°)

F_N——种勺对蔗种支持力，N

F_f——种勺对蔗种摩擦力，N

m——蔗种质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

充种过程中种勺摩擦力 F_f 所做功为 W，则其横向位移为 $-\sqrt{h/t}$（即蔗种下落至种勺底部时的位移），其中 h 为下落高度，该曲线为最速降线。由此可得摩擦力做功为

$$W = \int F_f \mathrm{d}s = \int mg\cos\beta\tan\varphi \mathrm{d}s = -\int_{-\sqrt{h/t}}^{0} mg\tan\varphi \sqrt{h/t}\mathrm{d}s \tag{3}$$

根据能量守恒定律有

$$\frac{1}{2}mv_z^2 + mgh = \int F_f \mathrm{d}s + \frac{1}{2}mv_x^2 \tag{4}$$

式中　v_z——蔗种初始下落速度，m/s

v_x——蔗种到达种勺底部时水平速度，m/s

由式(3)、(4)可得

$$v_z^2 + 2gh = -2g\tan\varphi \sqrt{h/t} + v_x^2 \tag{5}$$

代入抛物线方程 $z = tx^2$ 得到

$$\beta = \arctan\left(2h\left(\frac{2g\tan\varphi}{v_z^2 - v_x^2 + 2gh}\right)^2 x\right) \tag{6}$$

其中 h 为 20 mm，蔗种初始下落速度即为升运链线速度，实际试验过程中，排种器主动链轮转速取值范围为 28 ~ 126 r/min，得到升运链线速度取值范围为 0.134 ~ 0.503 m/s；v_x 为蔗种滑落至充种勺底部时的速度，在理想状态下蔗种到达底部时速度为零；前期试验测得摩擦角 φ 为 28° ~ 35°；x 为 $15\sqrt{3}$ mm，代入式(6)中得到 β 为 26° ~ 50°。由于 β 较小时，种勺中蔗种易被作业时的振动振出种勺，为了保证种勺中蔗种的稳定性，本文中 β 取较大值 45°。

2.1.3 充种过程动力学分析

充种过程是衡量排种器工作性能的重要指标，充种过程中蔗种间、蔗种与种勺间及蔗种与种箱组成复杂且不断变化的动力学系统。为研究种勺的设计参数，以待充蔗种为研究对象，利用达朗贝尔原理对其受力情况进行分析，如图 3 所示。

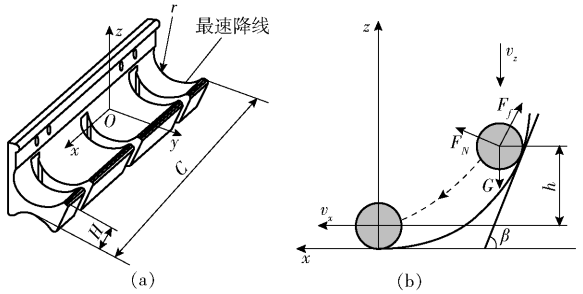


图 2　种勺结构图

Fig. 2　Structure of seed spoon

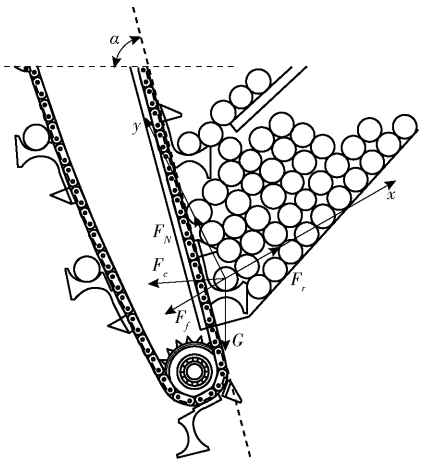


图 3　种勺中蔗种受力图

Fig. 3　Stress diagram of sugarcane in seed scoop

为实现平稳充种,根据达朗贝尔原理建立方程

$$\begin{cases} F_c\cos\alpha + F_N = mg\sin\varphi \\ F_c\cos\alpha + F_f + mg\cos\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha\right) \geqslant F_r \\ F_f = \mu_1 F_N \\ F_N = \mu_1 mg \\ F_r = \dfrac{2mv_s^2}{D} \end{cases} \tag{7}$$

式中 F_c——蔗种对种勺中蔗种的侧向压力,N

F_r——蔗种惯性离心力,N

v_s——升运链线速度,m/s

D——链轮分度圆直径,mm

α——排种器与水平面夹角,(°)

μ_1——种勺与蔗种静摩擦因数

整理得到

$$\alpha \geqslant \arcsin\frac{2v_s^2 + gD(\mu_1 - \mu_1^2 - \sin\varphi)}{gD} \tag{8}$$

由式(8)可得,排种器倾角 α 是影响种勺能否稳定充种的重要因素,并且与蔗种静摩擦角 φ、链轮分度圆直径 D、升运链线速度 v_s 有关,其中根据试验测得 μ_1 为 0.590。代入相关参数得到 $\alpha \geqslant 20.9°$,即相对于垂直状态,排种器倾角应小于 69.1°。为在台架试验中方便验证排种器与水平面夹角,本文在排种器试验台上加入了角度调节装置,如图 4 所示。

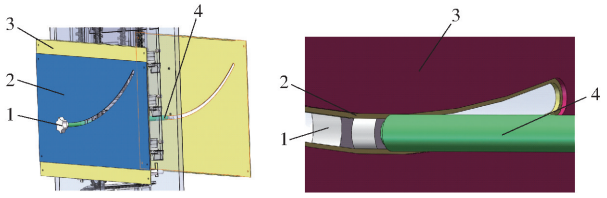


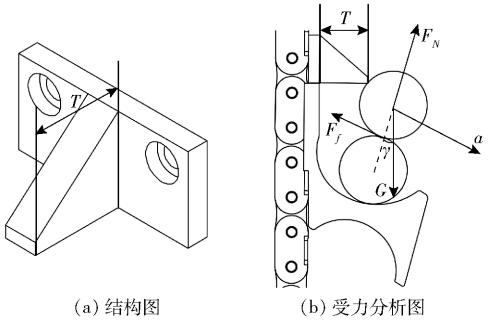
图 4 角度调节装置

Fig. 4 Schematic of angle adjusting device

1. 夹紧螺母 2. 定位板 3. 限位板 4. 支撑轴

2.2 清种器

由于蔗种的尺寸差异较大,种勺设计时需要大于单根蔗种的尺寸,导致了可能会有多根蔗种进入种勺。为此设计一种清种器,如图 5a 所示,在保留一根蔗种在种勺的同时清出多余的蔗种。



(a) 结构图 (b) 受力分析图

图 5 清种器结构示意图

Fig. 5 Schematics of seeds clearing

如图 5b,对多充的蔗种进行受力分析,若使蔗种能够从种勺中滚落,需有

$$\begin{cases} mg\sin\gamma - F_f < ma \\ \dfrac{1}{2}dF_f = I\psi \\ a = \dfrac{1}{2}d\psi \\ I = \dfrac{1}{10}md^2 \end{cases} \tag{9}$$

式中 γ——两蔗种圆心连线与垂线夹角,(°)

ψ——蔗种角加速度,rad/s^2

a——质心加速度,m/s^2

I——转动惯量,kg·m^2

得到

$$F_f < \frac{2}{7}mg\sin\gamma \tag{10}$$

由 $F_f = \mu_2 mg\cos\gamma$ 得

$$\frac{2}{7}mg\sin\gamma - \mu_2 mg\cos\gamma > 0 \tag{11}$$

$$\sin\left(\gamma + \arctan\left(-\frac{7}{2}\mu_2\right)\right) > 0 \tag{12}$$

式中 μ_2——蔗种与蔗种间滚动摩擦因数

代入相关参数后得到角度 γ 需大于等于 16.20°才可使多充的蔗种滚落,为了降低清种器对充种的影响,取角度 γ 的最小值 16.20°,此时清种器长度 T 为 22 mm。

2.3 升运链

升运链的尺寸影响到排种器的整体结构及工作效率,在保证实现基本运动的前提下,应能够在一定范围内调整结构参数和运动参数的需要,此外应尽量选择尺寸较小的链条和链轮以减小试验台整体尺寸。

在升运链设计中,链轮的大小直接决定了升运链的尺寸及工作效率。在升运链工作过程中,需要保证排种器的运行稳定,当蔗种在翻越主动链轮时,极易被甩出种勺,通过试验发现在主动链轮上方设计有护种罩时若蔗种被甩出种勺,部分蔗种将无法顺利投种,甚至被卡在护种罩与升运链之间无法下落。因此对该过程进行受力分析,得出使蔗种不被甩出种勺的最小链轮直径。如图 6 所示,当蔗种翻越主动链轮时,蔗种受到主动链轮离心力 F_r、种勺对蔗种的摩擦力 F_f、种勺对蔗种的支持力 F_N 及自身重力的共同作用。为了确保蔗种不被甩出,需使离心力小于重力与摩擦力分力之和,可以得到

$$\begin{cases} F_f + mg\sin\delta \geqslant F_r \\ F_N = mg\cos\delta \\ F_f = \mu_1 F_N \\ F_r = m\dfrac{v_s^2}{R} \end{cases} \tag{13}$$

整理可得

$$R \geqslant \frac{v_s^2}{g(\sin\delta + \mu_1 \cos\delta)} \tag{14}$$

式中　δ——种勺旋转角，(°)

R——链轮半径，mm

其中种勺最小旋转角取 30°，链轮最大线速度取 0.5 m/s。计算得 $R \geqslant 0.025$ m，为了适当提高作业速度的上限并参考链轮标准，选择链轮型号为 10A18 齿，半径为 43 mm。

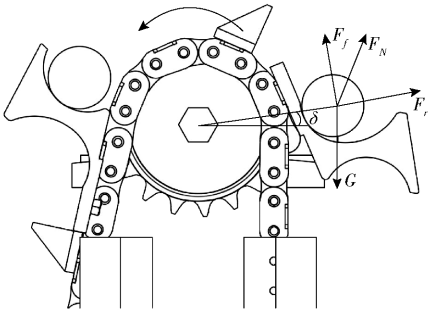


图 6　蔗种翻越链轮受力分析

Fig. 6　Schematic of seed ejector force analysis of sugarcane seed crossing sprocket

3　单因素试验

3.1　仿真试验

3.1.1　仿真模型的建立

为了确定种勺倾角的具体参数及种勺数量，利用 EDEM 软件进行了单因素仿真试验。蔗种作为体积较大的模型，其形状细节对仿真试验结果影响较小[24]，本文按照“新台糖 22 号”双芽段蔗种平均尺寸建立蔗种轮廓模型，使用多球面填充蔗种模型得到蔗种颗粒模型，如图 7 所示。

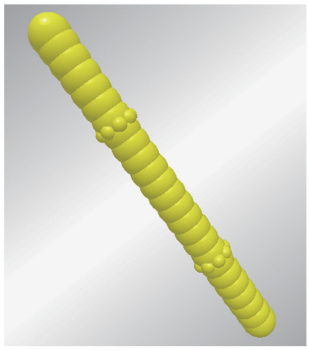


图 7　蔗种颗粒模型

Fig. 7　Particle model of sugarcane seed

在 SolidWorks 中对排种器进行建模，为了减少仿真过程中的计算量，对模型进行简化处理，将排种器简化为一条向上运动足够长的薄板，按照实际距离固定种勺和清种器。将模型作为几何体导入 EDEM 中，如图 8 所示。在 EDEM 中主种箱上方添加种子工厂用来模拟种层高度调节装置，在主种箱中落入一定量的蔗种后薄板开始向上运动，在本次仿真中，种层高度为种子工厂在最初的 1 s 内产生的蔗种所堆积的高度。

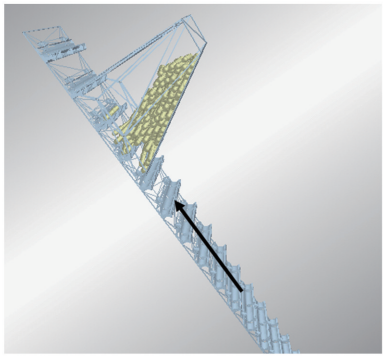


图 8　排种器仿真模型

Fig. 8　Simulation model of seed metering device

与蔗种接触的部件有种勺、清种器、主种箱，其中种勺和清种器为 ABS 塑料，主种箱为不锈钢材料。选择 Hertz - Mindlin(no slip)作为颗粒间及颗粒与排种器间的接触模型。经过前期试验和查阅文献[25 - 26]后确定蔗种-几何模型的本征参数及其相互之间的接触参数，如表 1 所示。

表 1　离散元仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters of EDEM

参数	蔗种	不锈钢	ABS 塑料
泊松比	0.458	0.3	0.34
剪切模量/MPa	10.82	70 000	3 000
密度/(g·cm^{-3})	1.058	7.800	1.250
碰撞恢复因数(与蔗种)	0.610	0.536	0.541
静摩擦因数(与蔗种)	0.451	0.490	0.562
滚动摩擦因数(与蔗种)	0.083	0.096	0.071

仿真试验中设置排种器倾角(薄板倾角)和种层高度的固定值为 15°和 250 mm。排种器作业速度按照传统单行种植模式计算，如图 9 所示。



图 9　单行种植模式

Fig. 9　Single-row planting model

作业速度与电机Ⅰ转速的关系为

$$v = \frac{3\pi L\lambda DnN}{50M} \tag{15}$$

式中　v——作业速度，m/s

n——电机Ⅰ转速,r/min

N——种勺数量

λ——电机与链轮传动比

M——链条长度,m

排种器相关参数如表 2 所示。

表 2 排种器相关参数

Tab. 2 Seed metering device related parameters

参数	数值
蔗种平均长度/m	0.34
蔗种平均首尾间隔/m	0.2
电机与链轮传动比	0.7
链轮分度圆直径/m	0.091 4
链条长度/m	2.476 5

根据种勺与清种器尺寸得到种勺间的最小间距为 137.5 mm,链条链节数为 90 个,在保证排种效率及各种勺间距相同的前提下,种勺数量取为 9、10、15、18 个。将所需参数代入式(15)得到 $v = 7.30 \times 10^{-4} Nn$。为了保证排种器能够在合适的作业速度下正常工作,试验中选择作业速度为 2 km/h(即 0.556 m/s),此时薄板上升速度取值为 1.020、0.918、0.612、0.510 m/s。

3.1.2 种勺倾角的影响

为了保证种勺的充种效果,在种勺参数设计中将种勺倾斜一定的角度并保持上述最速降线所得角度不变(如图 10,e_1、e_2 为种勺倾角,i_1、i_2 为种勺入口角,使 $e_1 < e_2$,$i_1 = i_2$),探究其对排种器充种效果的影响。

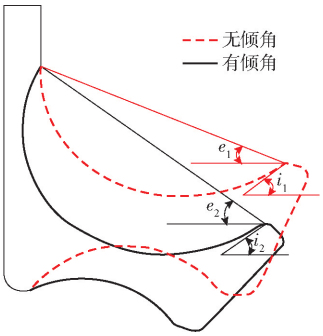


图 10 种勺倾角示意图

Fig. 10 Diagram of seed scoop angle

当种勺倾角逐渐增大时,由于种勺滑落点切线夹角不变,种勺入口路径逐渐变短,同时种勺深度也随着种勺倾角的增加而降低,从而降低蔗种在种勺中的稳定性。试验后得到在不影响充种的情况下,种勺倾角的最大值为 45°。

以充种合格指数(1 根/勺)和漏充指数(0 根/勺)为试验指标。分析种勺倾角为 0°、15°、30°、45°时对充种过程的影响,每组仿真试验统计 100 次充种过程,重复试验 3 次取平均值。试验结果如表 3 所示。

表 3 不同种勺倾角仿真结果

Tab. 3 Simulation results of different kinds of seed spoon inclination %

倾角/(°)	合格指数	漏充指数	平均合格指数	平均漏充指数
0	85	6	86.33	6.33
	88	6		
	86	7		
15	89	4	89.00	4.33
	91	4		
	87	5		
30	94	2	94.33	1.67
	95	2		
	94	1		
45	92	5	91.00	4.67
	91	4		
	90	5		

由表 3 可知,随着种勺倾角的增加,充种合格指数先增加后减小,漏充指数均先减小后增加,种勺倾角在 30°时,充种效果得到明显提高。如图 11 所示,在对种勺倾角分析后发现,随着种勺倾角的增加,种勺凹槽深度存在 $n_1 > n_2 > n_3$ 的关系,由此可得,种勺倾角能够通过降低种勺凹槽深度同时减少蔗种到达种勺底部所需的时间来提高种勺充种性能。当种勺倾角为 30°时,充种合格指数最高。

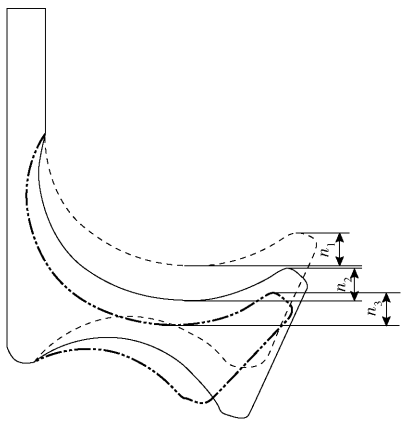


图 11 种勺倾角分析示意图

Fig. 11 Schematic of seed spoon inclination analysis

3.1.3 种勺数量的影响

种勺数量决定了种勺的间距,直接影响种勺充种的时间。种勺过少时不利于排种器排种效率的提高;种勺过多时不利于种勺充种,使漏充指数升高。

为研究种勺数量对充种性能的影响,仿真分析了种勺数量为 9、10、15、18 个(即种勺间距分别为 275、247.5、165、137.5 mm)时的充种情况,种勺倾角取 30°,其余仿真参数与前文一致,结果如表 4 所示。

表 4　不同种勺数量时性能仿真结果

Tab. 4　Simulation results of different seed spoon numbers

%

种勺数量/个	合格指数	漏充指数	平均合格指数	平均漏充指数
9	93	3	93.67	2.00
	94	1		
	94	2		
10	94	2	94.33	1.67
	94	2		
	95	1		
15	94	3	94.00	2.33
	94	2		
	94	2		
18	91	5	91.33	4.33
	91	4		
	92	4		

由表 4 可知，当种勺小于等于 15 个时，充种合格指数和漏充指数变化不大，当种勺大于 15 个时，呈现出合格指数减小、漏充指数增加的趋势。主要因为种勺数量过大导致种勺间距减小，相同链轮线速度的情况下，种勺充种时间被缩短，导致漏充指数增加。因此取种勺数量为 15 个。

3.2　台架试验

3.2.1　种层高度调节装置

由于蔗种体积较大，在试验时种层高度变化较大，为了保证试验结果的真实可靠，设计了种层高度调节装置以保证主种箱中种层高度不变，其原理为副种箱中下层的蔗种随拨种器向前运动，在挡种板作用下有序进入主种箱。试验时，预先在主种箱和副种箱内放入蔗种，调节拨种器工作速度与排种器排种速度一致实现主种箱中种层高度不变，预先放置于主种箱中蔗种的种层高度即为试验时的种层高度。

为了方便后续试验，对两个提供动力的电机在拨种器工作速度与排种器排种速度一致时的转速进行了试验。试验方法为将电机Ⅰ固定于一转速，测量此时排种器的排种速度（单位时间内的平均充种数），调节电机Ⅱ转速至蔗种从副种箱出种口拨出的平均速度与排种器的排种速度相同。每组试验重复 5 次取均值，得到两个电机转速组合如表 5 所示。

表 5　种层高度调节装置电机转速组合

Tab. 5　Seed layer height adjusting device motor combination

作业速度/（km·h^{-1}）	电机Ⅰ转速/（r·min^{-1}）	电机Ⅱ转速/（r·min^{-1}）
1.0	25	20
1.5	38	28
2.0	50	34
2.5	63	46
3.0	76	51
3.5	88	63

3.2.2　隔离板

种勺能够稳定充种的前提条件是主种箱中蔗种在作业时能够保证有序状态。在前期试验中发现部分多充的蔗种在被清种器清出种勺并落回主种箱后会导致原处于有序状态的种群出现乱种现象，导致排种器排种中断，如图 12 所示。



图 12　乱种现象示意图

Fig. 12　Diagram of random phenomenon

为此在主种箱中添加橡胶材质的隔离板，起到将被清蔗种与主种箱中待充蔗种隔离并重新排序的作用。如图 13 所示，影响隔离板隔离效果的因素主要为隔离板倾角 b，当隔离板倾角较大时，导致隔离效果降低；当隔离板倾角较小时，易发生蔗种堆积于隔离板上并间接导致乱种。由于被清蔗种下落状态受蔗种间、蔗种与隔离板、蔗种自身重力、蔗种下落角度等因素共同作用，通过对隔离板倾角进行单因素试验来确定最佳角度。

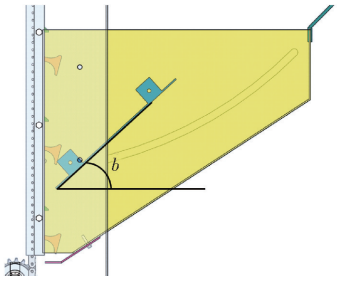


图 13　隔离板倾角示意图

Fig. 13　Diagram of isolation board inclination

经前期试验得到隔离板在倾角为 30° ~ 50°时能够起到隔离效果，以排种器是否出现乱种现象或隔离板堆积现象为试验指标，保证其他因素不变，设置隔离板倾角分别为 34°、42°、50°以及无隔离板，每组试验重复试验 3 次，由于蔗种数量限制，作业速度为 2 km/h 时，作业时间最长为 90 s，试验结果如表 6 所示。

表 6 不同隔离板倾角试验结果

Tab. 6 Test results of inclination of different insulation boards

隔离板倾角/(°)	是否出现乱种现象	从开始工作到排种中断时间/s
34	是	74
	否	
	是	89
42	否	
	否	
	否	
50	是	55
	是	78
	是	62
无隔离板	是	17
	是	31
	是	15

由试验结果可知,乱种现象的出现具有较大的偶然性,隔离板能够有效降低乱种现象发生的概率。当隔离板倾角为 42°时,隔离板的隔离效果最好。

4 性能试验

4.1 试验材料与设备

试验采用云南地区广泛种植的“新台糖 22 号”蔗种,于 2019 年 12 月在昆明理工大学农业与食品学院进行。试验采用自制的排种器试验台,如图 14 所示,试验过程中,排种器与种层高度调节装置固定安装在支架上,利用合肥富煌君达高科信息技术有限公司提供的千眼狼 5F01 型高速摄像机拍摄充种情况,待排种器工作稳定后统计排种器进行 50 个种勺的充种情况,每组试验重复 3 次取平均值。

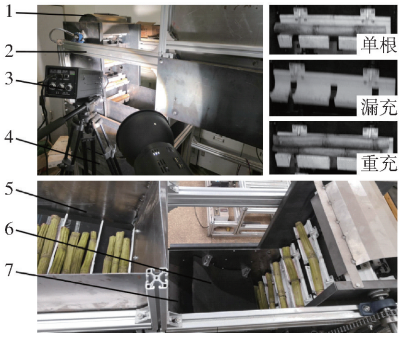


图 14 预切种甘蔗勺链式排种器试验台

Fig. 14 Test bench of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane

1. 护种罩 2. 支架 3. 高速摄像装置 4. 角度调节装置 5. 副种箱 6. 隔离板 7. 主种箱

4.2 试验方法与结果

为研究作业速度、排种器倾角和种层高度对预切种甘蔗勺链式排种器工作性能的影响,基于前文研究所确定设计参数,进一步研究各因素对排种器工作性能的影响,通过式(15)将电机Ⅰ转速转换为作业速度,采用二次回归旋转正交组合试验研究排种器最佳作业性能参数。试验因素编码如表 7 所示,试验设计方案与结果如表 8 所示,其中 X_1、X_2、X_3分别为作业速度、排种器倾角、种层高度的编码值,试验指标 Y_1、Y_2、Y_3分别为合格指数(1 根/勺)、漏充指数(0 根/勺)和重充指数(大于等于 2 根/勺)。

表 7 试验因素编码

Tab. 7 Test factors and coding

编码	因素		
	作业速度/(km·h^{-1})	排种器倾角/(°)	种层高度/mm
-1.682	1.16	6.59	165.9
-1	1.50	10.00	200.0
0	2.00	15.00	280.0
1	2.50	20.00	360.0
1.682	2.84	23.41	394.1

表 8 试验方案与结果

Tab. 8 Experiment design and results

序号	因素			性能指标		
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
1	-1	-1	-1	92.67	4.33	3.00
2	1	-1	-1	91.00	6.67	1.67
3	-1	1	-1	93.33	1.00	5.00
4	1	1	-1	91.66	7.67	0.67
5	-1	-1	1	93.33	4.67	2.00
6	1	-1	1	93.34	5.33	1.33
7	-1	1	1	88.66	1.67	9.67
8	1	1	1	90.66	3.67	5.67
9	-1.682	0	0	94.00	1.67	3.33
10	1.682	0	0	87.66	8.67	3.67
11	0	-1.682	0	92.66	6.67	0.67
12	0	1.682	0	88.66	3.67	7.67
13	0	0	-1.682	95.33	4.00	0.67
14	0	0	1.682	90.00	3.33	7.66
15	0	0	0	94.66	2.67	2.67
16	0	0	0	93.67	3.00	3.33
17	0	0	0	95.00	3.67	1.33
18	0	0	0	94.66	2.67	2.67
19	0	0	0	97.33	2.00	0.67
20	0	0	0	94.66	2.67	2.67
21	0	0	0	94.67	3.33	2.00
22	0	0	0	94.33	2.00	3.67
23	0	0	0	94.67	3.33	2.00

4.3 试验结果与分析

4.3.1 合格指数 Y_1

利用 Design-Expert 软件对合格指数试验数据进行方差分析,回归方程的显著性检验结果如表 9

表 9　方差分析

Tab. 9　Variance analysis

方差来源	合格指数				漏充指数				重充指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	106.49	9	6.03	0.002 0 **	81.12	9	19.53	<0.000 1 **	113.33	9	12.59	0.000 3 **
X_1	10.53	1	5.37	0.037 5 *	40.24	1	87.19	<0.000 1 **	6.97	1	6.97	0.044 6 *
X_2	11.92	1	6.07	0.028 4 *	10.61	1	22.98	0.000 4 **	44.97	1	44.97	<0.000 1 **
X_3	9.91	1	5.05	0.042 5 *	2.18	1	4.72	0.048 8 *	29.54	1	29.54	0.000 5 **
X_1X_2	0.50	1	0.25	0.623 9	4.02	1	8.71	0.011 3 *	5.01	1	5.01	0.082 2
X_1X_3	3.58	1	1.82	0.199 9	5.04	1	10.92	0.005 7 **	0.12	1	0.12	0.773 0
X_2X_3	9.40	1	4.79	0.047 5 *	0.68	1	1.47	0.246 9	15.15	1	15.15	0.006 0 **
X_1^2	26.23	1	13.37	0.002 9 **	8.90	1	19.29	0.000 7 **	1.69	1	1.69	0.294 4
X_2^2	38.74	1	14.65	0.002 1 **	8.90	1	19.29	0.000 7 **	5.03	1	5.03	0.081 6
X_3^2	6.43	1	3.28	0.093 5	0.74	1	1.61	0.226 3	5.00	1	5.00	0.082 5
残差	25.51	13			6.00	13			18.36	13		
失拟	17.47	5	3.48	0.057 5	3.31	5	1.97	0.187 5	11.24	5	2.53	0.117 1
误差	8.03	8			2.69	8			7.12	8		
总和	131.99	22			87.12	22			131.69	22		

注：* 表示影响显著（$0.01 < P < 0.05$），** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。

所示。合格指数模型 Y_1 的拟合度极显著（$P < 0.01$）。失拟项 $P = 0.057\,5$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素。各因素对合格指数影响由大到小为排种器倾角 X_2、作业速度 X_1、种层高度 X_3。排种器倾角与种层高度的交互项（X_2X_3）以及作业速度与排种器倾角的二次项（X_1^2、X_2^2）影响显著，剔除交互项中不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 94.84 - 0.88X_1 - 0.93X_2 - 0.85X_3 - 0.18X_2X_3 - 1.28X_1^2 - 1.34X_2^2 \quad (16)$$

4.3.2　漏充指数 Y_2

采用 Design-Expert 软件对漏充指数试验数据进行方差分析，回归方程的显著性检验结果如表 9 所示。漏充指数模型 Y_2 的拟合度极显著（$P < 0.01$）。失拟项 $P = 0.187\,5$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素，各因素对漏充指数影响由大到小为作业速度 X_1、排种器倾角 X_2、种层高度 X_3。作业速度与排种器倾角的交互项（X_1X_2）、作业速度与种层高度的交互项（X_1X_3）、作业速度及排种器倾角的二次项（X_1^2、X_2^2）影响显著，剔除交互项中不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 2.95 + 1.72X_1 - 0.88X_2 - 0.40X_3 + 0.71X_1X_2 - 0.79X_1X_3 + 0.75X_1^2 + 0.75X_2^2 \quad (17)$$

4.3.3　重充指数 Y_3

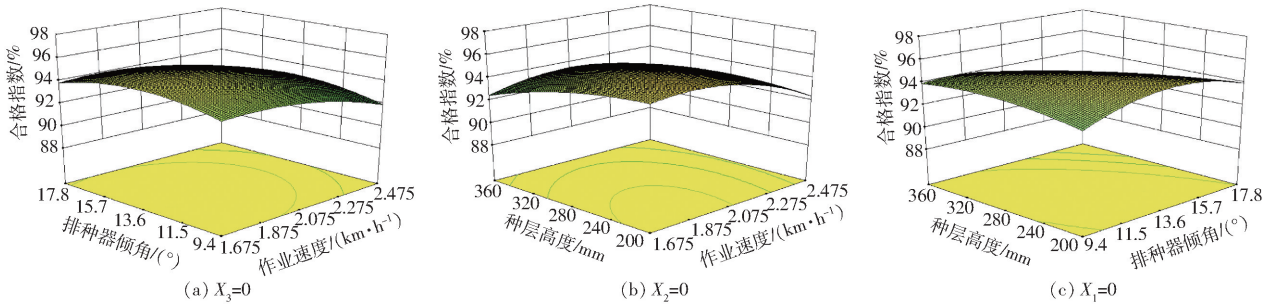
采用 Design-Expert 软件对重充指数试验数据进行方差分析，回归方程的显著性检验结果如表 9 所示。重充指数模型 Y_3 的拟合度极显著（$P < 0.01$）。失拟项 $P = 0.117\,1$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素，各因素对漏充指数影响由大到小为排种器倾角 X_2、种层高度 X_3、作业速度 X_1。排种器倾角与种层高度的交互项（X_2X_3）影响显著，剔除交互项中不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 2.34 - 0.71X_1 + 1.81X_2 + 1.47X_3 + 0.12X_2X_3 \quad (18)$$

4.4　各因素交互作用对合格指数的影响

通过对试验数据进行处理，可得作业速度、排种器倾角、种层高度交互作用对合格指数 Y_1 的影响，其响应曲面如图 15 所示。

图 15a 为种层高度 280 mm 时，作业速度和排种器倾角交互作用影响合格指数 Y_1 的响应曲面。由图可知，当作业速度处于较低水平时，随着作业速度



(a) X_3=0　　(b) X_2=0　　(c) X_1=0

图 15　因素交互作用影响合格指数的响应曲面

Fig. 15　Effects of interaction factors on eligible rate

的增加,排种器本身的振动幅度逐渐增加,能够提升清种效果,重充指数降低同时合格指数呈现上升趋势,当作业速度处于较高水平时,排种器本身振动幅度较大,种勺中蔗种弹出种勺的几率增加,同时由于种勺充种时间降低,漏充指数增加,合格指数呈下降趋势。

图 15b 为排种器倾角 15°时,作业速度和种层高度交互作用影响合格指数 Y_1 的响应曲面。当种层高度处于较低水平时,随着种层高度的增大,种群中上层蔗种对下层蔗种的压力逐渐增加,能够促进充种,降低漏充指数,此时合格指数呈上升趋势,当种层高度处于较高水平时,上层蔗种对下层蔗种压力过大,导致重充指数升高,此时合格指数呈下降趋势。

图 15c 为作业速度 2 km/h 时,排种器倾角和种层高度交互作用影响合格指数 Y_1 的响应曲面。当种层高度处于较低水平时,随着种层高度的增加,种群中上层蔗种对下层蔗种的压力逐渐增加,同时由于隔离板的存在使接触种勺的蔗种数量一定,促进充种,降低漏充指数,此时合格指数呈上升趋势,当种层高度处于较高水平时,上层蔗种对下层蔗种压力过大,导致重充指数升高,此时合格指数呈下降趋势;由于排种器倾角与种层高度的作用机理均为上层蔗种对下层蔗种的压力,排种器倾角与种层高度呈现较大的相关性。

4.5 参数优化

为确定最佳参数取值范围,设定合格指数大于 93%,重充指数和漏充指数均小于 5%,确保种箱中有足够多的蔗种,设置种层高度为 360 mm,优化所得最佳参数范围如图 16 所示,得到作业速度取值范围为 1.45 ~ 2.37 km/h,排种器倾角取值范围为 9.53° ~ 15.15°。

对优化后的理论结果进行试验验证。在相同试验条件下选取种层高度为 360 mm,作业速度为 1.45 ~ 2.37 km/h,排种器倾角为 9.53° ~ 15.15°,进行 3 次重复验证试验。经验证试验可得该条件下排种器充种平均合格指数为 95.33%,平均漏充指数为 3.11%,平均重充指数为 1.56%,试验结果与优化结果一致。

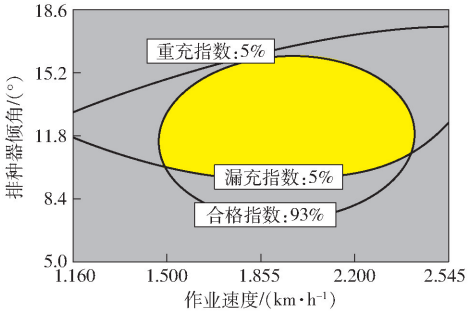


图 16 参数优化分析图

Fig. 16 Parameter optimization analysis chart

5 结论

(1)针对云南省甘蔗种植现状及预切种种植机排种不均、漏充现象严重的问题,设计了一种预切种甘蔗勺链式排种器,以充种条件为依据通过理论计算和运动分析确定了种勺、清种器、升运链的基本参数。

(2)针对种勺倾角和种勺数量进行了基于 EDEM 的单因素仿真试验,确定了种勺倾角为 30°,种勺数量为 15 个;针对隔离板倾角进行了单因素试验,确定了隔离板倾角为 42°。

(3)以作业速度、排种器倾角、种层高度为试验因素,以合格指数、漏充指数、重充指数为试验指标进行了二次回归旋转正交试验,运用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,得到合格指数、漏充指数、重充指数的回归方程。当种层高度为 360 mm、作业速度为 1.45 ~ 2.37 km/h、排种器倾角为 9.53° ~ 15.15°时,排种器平均合格指数为 95.33%,平均漏充指数为 3.11%,平均重充指数为 1.56%。

参 考 文 献

[1] 韦巧,杨宝玲,高振江. 我国甘蔗产业化现状浅析[J]. 农机化研究,2015,37(4):247 - 254.
WEI Qiao, YANG Baoling, GAO Zhenjiang. Analysis of current situation of sugarcane industry[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(4):247 - 254. (in Chinese)

[2] 吴才文, 赵俊, 刘家勇. 现代甘蔗种业[M]. 北京:中国农业出版社, 2014.

[3] 张跃彬. 云南双高甘蔗标准化综合技术[M]. 昆明:云南科技出版社, 2004.

[4] 杨加万. 云南甘蔗生产现状与发展对策[J]. 农业与技术,2018,38(6):155 - 156.
YANG Jiawan. Production status and development strategies for Yunnan sugarcane[J]. Agriculture and Technology,2018,38(6):155 - 156. (in Chinese)

[5] 邓军,武晋宇,朱建荣,等. 2018 年云南甘蔗产业损害监测预警分析[J]. 中国糖料,2018,40(6):77 - 80.
DENG Jun, WU Jinyu, ZHU Jianrong, et al. Sugarcane industry damage monitoring and early warning analysis in Yunnan 2018[J]. Sugar Crops of China,2018,40(6):77 - 80. (in Chinese)

[6] KERR B. Industry news: mizzi mound billet planter aims to reduce NQ costs[J]. Australian Canegrower,2007(8):19 - 20.

[7] RAVINDRA N, ANNMALAI S J K, VIJAYAN NAIR N. Studies on mechanisation of planting of sugarcane bud chip settings raked in protrays[J]. Sugar Tech.,2013,15(1):27 - 35.
[8] 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)
[9] 赵映,肖宏儒,许立明,等. 广西甘蔗机械化种植发展现状、新趋势及对策[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):383 - 387.
[10] RAZAVI J, NAMJOO M. Determination of forward speed effect on planning uniformity in a sugarcane billet planter[J]. Canadian Society for Bioengineering,2010,24(6):13 - 17.
[11] 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 and Latin America,2014,45(2):57 - 64.
[12] THIENYAEM T, SAENGPRACHATANARUG K, WONGPICHET S. The influence of the metering device arrangement to the discharging consistency of the sugarcane billet planter[J]. Advanced Materials Research,2014,931:1561 - 1567.
[13] THIENYAEM T, SAENGPRACHATANARUG K, UENO M. Analysis of discharge consistency and performance of a sugarcane billet planter with side-conveyer concept[J]. KKU Engineering Journal,2016,43(1):9 - 12.
[14] NAMJOO M, RAZAVI J, KHAN A. Fabrication and evaluation of a metering device for a sugarcane billet planter[J]. Centenary University Journal of Agricultural Sciences,2015,25(1):1 - 12.
[15] TAGHINEZHAD J, ALIMARDANI R, JAFARI A. Design development and evaluation of a new mechanism for sugarcane metering device using analytical hierarchy method and response surface methodology[J]. Sugar Tech.,2015,17(3):258 - 265.
[16] SAENGPRACHATANARUG K, CHALOEMTHOI C, KAMWILAISAK K, et al. Effect of metering device arrangement to discharge consistency of sugarcane billet planter[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food,2018,11(3):139 - 144.
[17] 韩杰,文晟,刘庆庭,等. 预切种式甘蔗种植机的设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2019,40(4):109 - 118.
HAN Jie, WEN Sheng, LIU Qingting, et al. Design and test of pre-cutting type sugarcane planter[J]. Journal of South China Agricultural University,2019,40(4):109 - 118. (in Chinese)
[18] 何冯光. 电磁振动式单芽段蔗种排种装置设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2018.
HE Fengguang. Design and experimental research of electromagnetic vibration single-bud sugarcane seeding device[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2018. (in Chinese)
[19] 刘鹏,徐灿,孟为国. 预斩种式甘蔗播种机关键部件设计[J]. 农业开发与装备, 2016(6):52.
LIU Peng, XU Can, MENG Weiguo. Design of key components of pre-cutting sugarcane planter[J]. Agricultural Development & Equipments,2016(6):52. (in Chinese)
[20] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):113 - 121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200413&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.013. (in Chinese)
[21] 董学虎,牛钊君,李明,等. 槽轮式甘蔗健康种苗种植机的设计与试验检测[J]. 机械设计与制造,2017(12):265 - 268.
DONG Xuehu, NIU Zhaojun, LI Ming, et al. Design and experiment examination of geneva sugarcane healthy seedcane planter[J]. Machinery Design & Manufacture,2017(12):265 - 268. (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/OL]. 农业机械学报,2020,51(7):72 - 81.
MA Fanglan, LIU Tianxiang, LI Shangping, et al. Design and test of transverse transplanter for pre-cut sugarcane[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):72 - 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200709&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.009. (in Chinese)
[23] 仲云龙,张永良,闫军朝,等. 旋耕灭茬施肥播种联合作业机导种管设计[J]. 农机化研究,2011,33(12):98 - 99.
ZHONG Yunlong, ZHANG Yongliang, YAN Junchao, et al. Design of seed guidetube of rotary tillage and stubble fertilization and seeding combined operation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(12):98 - 99. (in Chinese)
[24] BHARADWAJ R, KETTERHAGEN W R, HANCOCK B C. Discrete element simulation study of a freeman powder rheometer[J]. Chemical Engineering Science,2010,65(21):5747 - 5756.
[25] 罗菊川,文晟,李涵光,等. 甘蔗尾茎泊松比的试验分析[J]. 华南农业大学学报,2017,38(6):118 - 124.
LUO Juchuan, WEN Sheng, LI Hanguang, et al. Experimental study on Poisson's ratio of sugarcane tail stalk[J]. Journal of South China Agricultural University,2017,38(6):118 - 124. (in Chinese)
[26] 李科. 垄沟甘蔗割铺机仿形割台设计及其仿真分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
LI Ke. Design and simulation analysis on copying header of sugarcane harvester cutter in ridge-forrow planting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2018. (in Chinese)