

甘蔗横向播种器斜槽转向供种装置设计与试验

钟家勤¹ 董德坤¹ 李尚平² 李凯华² 黄宗晓³ 文春明²

(1. 北部湾大学机械与船舶海洋工程学院, 钦州 535011; 2. 广西民族大学物理与电子信息学院, 南宁 530006;
3. 广西电力职业技术学院智能制造工程学院, 南宁 530299)

摘要: 针对预切种双芽段甘蔗横向播种器供种环节存在供种机构复杂、效率低、转向精度低、易卡蔗、难以适应横向精准播种要求等问题,提出了一种斜槽转向的供种装置。阐述了斜槽转向供种装置的工作原理,建立了供种转向过程的力学理论模型,揭示了关键结构参数与工作参数对甘蔗转向的影响规律,并据此确定了实现横向供种的较优参数组合。基于离散元法(DEM)的甘蔗碰撞仿真试验进一步表明,甘蔗的横向转动主要受斜槽碰撞产生的 x 、 y 方向转动力矩作用驱动,且该转动力矩与斜槽底板角度、下落高度、斜槽宽度相关。由单因素仿真试验结果发现:转向合格率随斜槽底板角度的增大呈先上升后平稳趋势,并在 35° 后趋于稳定。当下落高度为100 mm时,下落能量不足导致转向合格率显著降低。此外,当斜槽宽度大于甘蔗长度时,甘蔗易发生纵向偏转,致使横向转向合格率下降。响应面分析与验证试验表明,斜槽底板角度、下落高度、斜槽宽度,以及交互项对转向合格率有显著性影响。当斜槽底板角度为 34.9° ,下落高度为296.5 mm,且斜槽宽度为214.9 mm时,转向合格率达98.4%,预测值(99%)与试验值(98.4%)相对误差仅为0.6个百分点,验证了模型的可靠性。

关键词: 预切种甘蔗; 斜槽转向; 供种装置; 横向播种

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0217-12 OSID: 

Design and Experiment of Directional Chute Seed Supply Device for Sugarcane Lateral Seeder

Zhong Jiaqin¹ Dong Dekun¹ Li Shangping² Li Kaihua² Huang Zongxiao³ Wen Chunming²

(1. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China
2. College of Physics and Electronic Information, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China
3. College of Intelligent Manufacturing Engineering, Guangxi Electrical Polytechnic Institute, Nanning 530299, China)

Abstract: Regarding the problems in the seed supply stage of the lateral planter for precut double-bud sugarcane segments, such as complex seed supply mechanisms, low efficiency, low steering accuracy, susceptibility to jamming, and difficulty in meeting lateral precision planting requirements, a chute steering seed supply device was proposed. The working principle of the chute-type lateral seed supply device was expounded, and a theoretical mechanical model for seed steering was established. The influence patterns of key structural and operational parameters on sugarcane segment steering were analyzed, enabling determination of preferable parameters for lateral sugarcane seed supply. Discrete element method (DEM) simulations of sugarcane collisions demonstrated that the lateral rotation of sugarcane segments was primarily governed by the rotational torques generated along the x and y axes during their impact within the chute. These bidirectional rotational torques were influenced by three key parameters: the steering drop height, chute width, and inclination angle of the chute base plate. Based on simulation-guided single-factor experiments, the results indicated that the steering qualification rate was initially increased and then stabilized with the increase of chute base plate angle, plateauing beyond 35° . At a drop height of 100 mm, insufficient drop energy resulted in a significant decrease in qualification rate. Furthermore, when the chute width exceeded the sugarcane length, sugarcane tended to undergo longitudinal deflection, resulting in reduced lateral steering qualification rate. Box – Behnken

收稿日期: 2025-07-08 修回日期: 2025-10-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(52165009)和广西科技计划联合专项(2025JJH160025)
作者简介: 钟家勤(1989—),女,副教授,博士,主要从事农业机械与精准农业技术研究,E-mail: 807358671@qq.com
通信作者: 李尚平(1956—),男,教授,博士,主要从事甘蔗全程机械化与智能化研究,E-mail: 3410382515@qq.com

Design response surface methodology experiments and validation tests confirmed that chute base plate inclination, steering drop height, chute width, and their two-way interaction terms significantly influenced the steering qualification rate. The maximum qualification rate of 98.4% was achieved at a base plate inclination of 34.9°, steering drop height of 296.5 mm, and chute width of 214.9 mm. The mere 0.6 percentage points discrepancy between the predicted value (99%) and experimental result (98.4%) validated the model's reliability.

Key words: pre-cutting sugarcane; directional chute; seed supply device; lateral seeding

0 引言

甘蔗是我国重要的糖料作物,产糖量占全国糖产量的90%以上。其中,广西是我国最大的甘蔗主产区,种植面积和产量均居全国首位。在甘蔗生产各环节中,种植作业劳动强度大、作业组织复杂,目前仍以人工或半机械化播种为主^[1]。普遍存在用工多、排种效率低及作业稳定性差等问题,成为制约甘蔗产业降本增效和规模化的突出瓶颈。

目前比较成熟的甘蔗种植机械^[2]有3类:整杆式种植机、实时切断式种植机、预切种式种植机。国内主要采用实时切断式甘蔗种植机,结构简单、操作便捷,但存在人工劳动强度大,漏种率高,无法脱毒种苗等问题^[3]。

预切种式甘蔗种植则采用预先筛选良种切段、消毒,再经种植机种植,可一次性完成开沟、播种、施肥、覆土覆膜等环节,自动化程度高^[4]。该机型主要应用于澳大利亚、巴西、阿根廷等农业发达国家,采用供种箱与上提槽结合的全自动播种技术^[5-7],通过集成化设计实现高效连续自动作业。但其存在用种成本高、伤芽、播种不精准等缺点。为克服这些问题,许多学者对该播种器的供种箱^[8-9]、传送带倾角^[10]、蔗槽^[11-13]等进行装置适应性改良^[14-17],以提高播种性能、减少耗种量并降低成本^[18]。虽然这些改良提升了设备对小地块与复杂地形的适应性,但供种易堵塞、播种易乱序,尚未突破精准播种的技术瓶颈,且此类设备通常用于预切种的纵向种植。

相比之下,预切种双芽段甘蔗横向种植以其分蘖强、出芽率高、耗种量少等优势^[19],目前正在广西“双高”基地进行大面积推广^[20]。然而,为了提高甘蔗横向种植播种精度,当前国内普遍采用半自动化机械种植的方式,需要人工辅助播种。这种方式虽能实现预切种甘蔗的横向种植,但存在用工多、劳动强度大、种植效率低等问题亟待解决。

本文设计一种甘蔗播种器的斜槽转向供种装置,建立甘蔗横向供种过程的力学模型,仿真模拟甘蔗碰撞的力学特性,深入分析供种转向机制。在此基础上,通过试验对关键结构参数和工作参数进行分析与优化,旨在提升甘蔗横向供种性能,为后续实

现高精度横向播种奠定基础。

1 总体结构与工作原理

1.1 播种器总体结构

预切种甘蔗横向种植机的播种器主要由供种装置、集蔗箱、播种带及其驱动电机等核心部件构成,其总体结构如图1所示。播种器工作时,启动播种电机驱动播种带运转。同时,供种装置在振动电机、供种辊驱动电机和横向输送电机的协同作用下运行:振动电机促使供种箱内杂乱的甘蔗段产生定向运动;供种辊驱动电机带动供种辊旋转,实现甘蔗段的单种分离输送;横向输送电机则驱动横向输送带将分离后的甘蔗段沿横向稳定输送。经过导流板的初步导向、供种辊的精确分离以及斜槽的定向滑移后,甘蔗段被有序地横向输送至集蔗箱中暂存。随后,集蔗箱内处于横向姿态的甘蔗段,在运转的播种带作用下,被精准拾取、有序提升,并最终向后输送至开沟器后方完成播种作业。

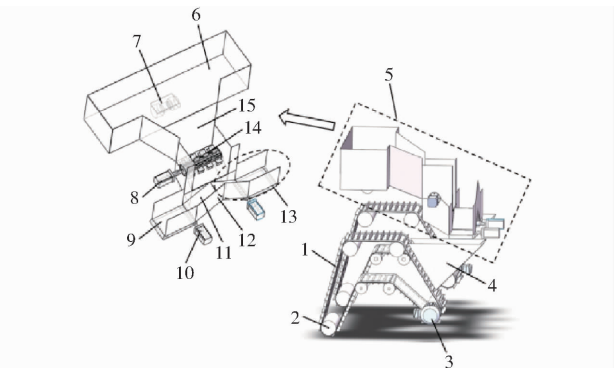


图1 甘蔗横向播种器结构示意图

Fig.1 Schematic of sugarcane lateral seeder structure

1. 播种带 2. 播种辊 3. 播种电机 4. 集蔗箱 5. 供种装置
6. 供种箱 7. 振动电机 8. 供种电机 9. 横向输送带 10. 横向
- 输送电机 11. 斜槽底板 12. 挡板 13. 斜槽 14. 供种辊
15. 导流板

1.2 斜槽式转向供种装置工作原理

供种装置是预切种甘蔗横向种植机实现稳定、横向供种的核心部件。本装置主要由供种箱、振动电机、导流板、供种辊、供种电机、斜槽式转向机构、横向输送带及横向输送电机等组成,结构如图2所示。

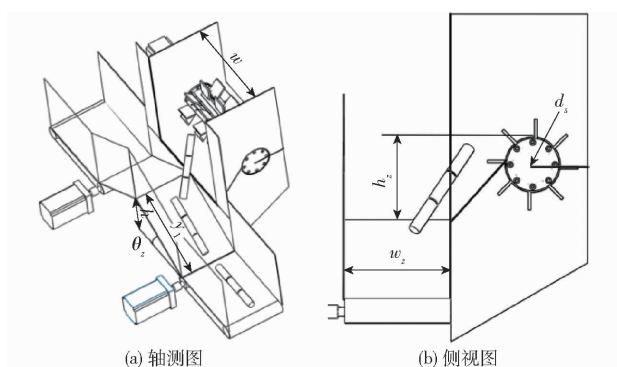


图 2 斜槽转向供种装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of directional chute seed supply device

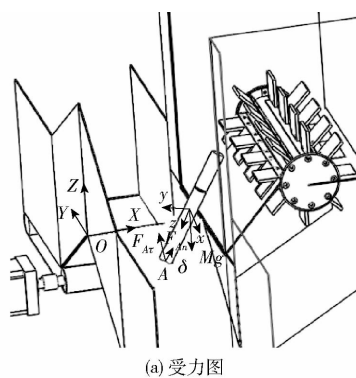
供种过程如下:振动电机作用于供种箱,有效减小甘蔗种段间的交错互锁,促使其向供种辊入口方向移动,实现初步输送。供种辊表面设计有 V 型齿槽^[21],其旋转过程中,齿槽的耙齿将甘蔗种段逐个分离并导向至斜槽入口。供种辊出口衔接斜槽转向装置。该装置由呈倒 V 型布置的两块斜槽底板及挡板合围形成两条独立的转向通道。基于流体力学原理,斜槽利用物料流动的定向特性^[22],使不同初始姿态的甘蔗种段在滑落过程中自动调整至横向姿态,实现顺畅转向并避免堆叠堵塞。无序输入的甘蔗种段经此机构被分流为两股,为后续双行播种奠定基础。为确保甘蔗种段以稳定的横向姿态进入集蔗箱,在斜槽末端设置了横向输送带。该输送带对种段进行加速,赋予其足够的动能,使其能够可靠地横向抛落至集蔗箱内。至此,通过供种装置的协同作用,甘蔗种段完成了从无序到有序、从任意姿态到统一横向姿态、从供种箱到集蔗箱的高效、短程转向输送。

2 斜槽转向供种装置关键参数设计

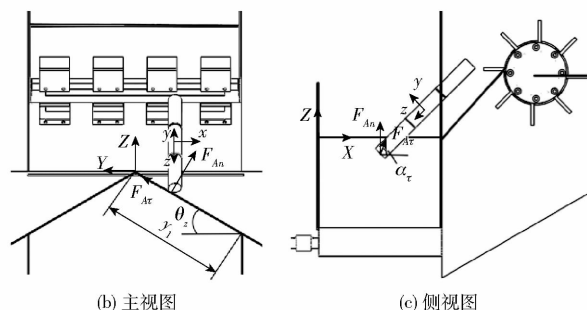
供种装置的核心任务是将供种箱内原本杂乱无序的甘蔗进行有效整理与排序,并持续、稳定地输送至播种器的集蔗箱中。其中,确保甘蔗在输送过程中形成并维持横向有序状态,是供种环节的首要作业目标,决定了后续横向播种的质量。因此,下面从碰撞运动学入手分析转向机理,并对装置关键参数进行设计计算。

2.1 甘蔗碰撞转向运动学分析

当甘蔗下落与斜槽底板碰撞时,甘蔗与斜槽底板碰撞后的碰撞力如图 3 所示,其中 OXYZ 为固定坐标系,oxyz 为运动坐标系。碰撞后,甘蔗在接触点 A 碰撞力 F_A 作用下发生偏转,其碰撞力分为法向力 F_{An} 和切向力 F_{Ar} (即摩擦力),法向力不通过质心,且与斜槽底板垂直。



(a) 受力图



(b) 主视图

(c) 侧视图

图 3 接触点 A 的碰撞力示意图

Fig. 3 Collision force at contact point A

甘蔗与斜槽底板碰撞后切向力与法向力呈正比的关系,即

$$F_{Ar} = \mu F_{An} \quad (1)$$

式中 μ ——甘蔗与斜槽底板的摩擦因数
法向力在运动坐标系中的三轴分量为

$$\begin{cases} F_{Anx} = F_{An} \sin \theta_z \\ F_{Any} = F_{An} \cos \theta_z \cos \delta \\ F_{Anz} = -F_{An} \cos \theta_z \sin \delta \end{cases} \quad (2)$$

式中 δ ——碰撞时甘蔗长轴与固定坐标系中水平面的夹角(下称“下落角度”),($^\circ$)

F_{Anx} 、 F_{Any} 、 F_{Anz} ——甘蔗碰撞后法向力在 x 、 y 、 z 轴上的分量,N

θ_z ——斜槽底板角度,($^\circ$)

切向力在运动坐标系中的三轴分量分别为

$$\begin{cases} F_{Arx} = -F_{Ar} \cos \alpha_r \cos \theta_z \\ F_{Ary} = F_{Ar} \sin \alpha_r \sin \theta_z \cos \delta \\ F_{Arz} = -F_{Ar} \sin \alpha_r \sin \theta_z \sin \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_{Arx} 、 F_{Ary} 、 F_{Arz} ——甘蔗碰撞后切向力在 x 、 y 、 z 轴的分量,N

α_r ——滑动方向与 X 轴之间的夹角,($^\circ$)

将式(1)代入式(3)可得

$$\begin{cases} F_{Arx} = -\mu F_{An} \cos \alpha_r \cos \theta_z \\ F_{Ary} = \mu F_{An} \sin \alpha_r \sin \theta_z \cos \delta \\ F_{Arz} = -\mu F_{An} \sin \alpha_r \sin \theta_z \sin \delta \end{cases} \quad (4)$$

根据式(2)、(4)碰撞后运动坐标系的三轴分量为

$$\begin{cases} F_x = F_{Anx} + F_{A\tau x} = F_{An}(\sin\theta_z - \mu\cos\alpha_\tau\cos\theta_z) \\ F_y = F_{Any} + F_{A\tau y} = F_{An}(\cos\theta_z + \mu\sin\alpha_\tau\sin\theta_z)\cos\delta \\ F_z = F_{Anz} + F_{A\tau z} = -F_{An}(\cos\theta_z + \mu\sin\alpha_\tau\sin\theta_z)\sin\delta \end{cases} \quad (5)$$

在运动坐标系下,设碰撞力的作用点 A 的坐标为

$$(x_A, y_A, z_A) = \left(-R\sin\theta_z, -R\cos\theta_z, \frac{l}{2} \right) \quad (6)$$

式中 R ——甘蔗半径,mm

l ——甘蔗长度,mm

力对点的矩的矢积表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_A(\mathbf{F}_A) = \mathbf{r}_A \times \mathbf{F}_A &= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x_A & y_A & z_A \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \\ &= (y_A F_z - z_A F_y)\mathbf{i} + (z_A F_x - x_A F_z)\mathbf{j} + \\ &+ (x_A F_y - y_A F_x)\mathbf{k} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ —— x, y, z 轴的单位向量

$\mathbf{r}_A$ ——矢径,mm

$\mathbf{L}_A(\mathbf{F}_A)$ ——甘蔗与斜槽底板碰撞力对质心的力矩矢量, $\text{N}\cdot\text{m}$

碰撞力对甘蔗质心的力矩在运动参考坐标系下的三轴分量为

$$\begin{cases} L_x = -RF_z\cos\theta_z - \frac{l}{2}F_y \\ L_y = \frac{l}{2}F_x + RF_z\sin\theta_z \\ L_z = -RF_y\sin\theta_z + RF_x\cos\theta_z \end{cases} \quad (8)$$

式中 L_x, L_y, L_z ——甘蔗质心力矩在 x, y, z 轴的分量, $\text{N}\cdot\text{m}$

根据 Hertz 碰撞接触力学理论,将甘蔗与斜槽底板间的接触瞬间认为是球体与刚性平面的接触,则甘蔗与斜槽底板接触碰撞的最大接触碰撞力^[23] F_A 为

$$F_A = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}}\left(\frac{15mgh_z}{8R^{\frac{1}{2}}E}\right)^{\frac{3}{5}} \quad (9)$$

式中 E ——等效弹性模量,Pa

h_z ——供种辊辊筒最高点与斜槽最高点的距离,下称“下落高度”,mm

m ——甘蔗质量,kg

最大接触碰撞力的法向力为

$$\begin{aligned} F_{An} &= \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}}\left(\frac{15mgh_z}{8R^{\frac{1}{2}}E}\right)^{\frac{3}{5}}\cos\theta_z = \\ &= k_{An}h_z^{3/5}\cos\theta_z \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $k_{An} = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}}\left(\frac{15mg}{8R^{\frac{1}{2}}E}\right)^{\frac{3}{5}}$

将式(5)、(10)代入式(8),可得甘蔗碰撞斜槽底板后的质心力矩在运动坐标系下的三轴分量

$$\begin{cases} L_x = \left(R\sin\delta\cos^3\theta_z + \frac{R}{2}\mu\sin\alpha_\tau\sin\delta\cos\theta_z\sin(2\theta_z) - \right. \\ \left. \frac{l}{2}\cos\delta\cos^2\theta_z - \frac{l}{4}\mu\sin\alpha_\tau\cos\delta\sin(2\theta_z) \right) k_{An}h_z^{3/5} \\ L_y = \left(\frac{l}{4}\sin(2\theta_z) - \frac{l}{2}\mu\cos\alpha_\tau\cos^2\theta_z - \right. \\ \left. \frac{R}{2}\sin\delta\cos\theta_z\sin(2\theta_z) - \right. \\ \left. \frac{R}{2}\mu\sin\alpha_\tau\sin\delta\sin\theta_z\sin(2\theta_z) \right) k_{An}h_z^{3/5} \\ L_z = (\cos\theta_z\sin(2\theta_z) - \cos\delta\cos\theta_z\sin(2\theta_z) - \\ \mu\sin\alpha_\tau\cos\delta\sin\theta_z\sin(2\theta_z) - 2\mu\cos\alpha_\tau\cos^3\theta_z) \frac{R}{2}k_{An}h_z^{3/5} \end{cases} \quad (11)$$

由上述分析可知,碰撞冲击力的法向力随斜槽底板角度的增加而减小,且甘蔗转动力矩 L_x, L_y, L_z 与斜槽底板角度 θ_z 有直接相关关系。甘蔗碰撞冲击力的法向力随下落高度 h_z 的增加而逐渐增大。甘蔗的转动力矩 L_x, L_y, L_z 与下落高度呈显著正相关关系,与下落角度 δ 存在相关关系。综上所述,甘蔗斜槽中转向的主要影响因素为斜槽底板角度、落种高度、下落角度。

2.2 斜槽底板角度

甘蔗进入斜槽的速度,在忽略摩擦力的情况下,即为供种辊的线速度。供种辊采用 V 型齿槽式辊,其可适应无序蔗段不同姿态的输送。为更好地向后输送,供种辊的周长应大于甘蔗的长度^[24],即

$$\pi d_{\text{min}} > l \quad (12)$$

式中 d_{min} ——供种辊最小外径,mm

计算得到 $d_{\text{min}} > 96 \text{ mm}$,在满足供种辊的最小直径要求下,取供种辊半径 R_s 为 50 mm。

根据文献[19],预切种式双行横向甘蔗种植机种植平均耗种约为 $6\,000 \text{ kg/hm}^2$,播种速率 v_a 为 $0.2 \sim 0.5 \text{ hm}^2/\text{h}$ 。本文甘蔗长度 l 约 300 mm,甘蔗平均直径 d_{ave} 为 30 mm,单根甘蔗平均质量 M 为 0.25 kg,供种辊宽度 w 为 350 mm,则齿形供种辊单层可并行输入的甘蔗数量为

$$n = \frac{w}{2d_{\text{ave}}} \approx 6 \quad (13)$$

式中 n ——甘蔗数量,根

甘蔗在供种过程中的输送效率为

$$\eta_g = M_a v_a / 3\,600 \quad (14)$$

式中 η_g ——供种辊输送效率, kg/s

M_a ——平均耗种量,为 $6\,000 \text{ kg/hm}^2$

考虑重播指数,计算得到 $0.33 \text{ kg/s} < \eta_g < 0.89 \text{ kg/s}$ 。

蔗段在供种辊中的输送线速度应满足

$$v_0 = \frac{\eta_g l}{Mn} \tag{15}$$

式中 v_0 ——供种辊线速度,mm/s

计算得到输送线速度范围为 70 ~ 170 mm/s,本课题组经过前期试验验证取 v_0 为 150 mm/s。

为保证甘蔗在斜槽上可运动,重力在斜槽的分量应大于摩擦力,即

$$Mg\sin\theta_z \geq \mu Mg\cos\theta_z \tag{16}$$

得 $\theta_z \geq \arctan\mu$ (17)

根据文献[20], $\theta_z \geq 11^\circ$ 。考虑整机的高度,斜槽的高度小于 0.5 m,通过图 4 的结构分析,斜槽角度为

$$\theta_z = \arctan \frac{2h}{w} \tag{18}$$

式中 h ——斜槽底板高度,mm

计算得到 $\theta_z \approx 70^\circ$,因此,后续仿真试验选择 $15^\circ \sim 70^\circ$ 进行转向力矩分析。

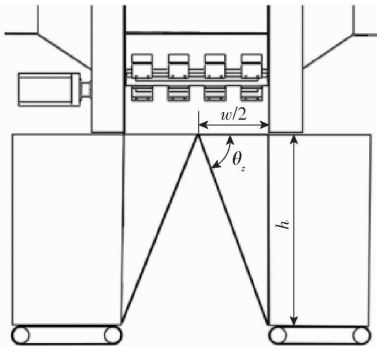


图 4 斜槽角度结构分析

Fig.4 Structural analysis of chute angle

2.3 下落角度

以落入斜槽顶端为例说明甘蔗在空中的运动,甘蔗从供种辊脱离后的运动如图 5 所示。

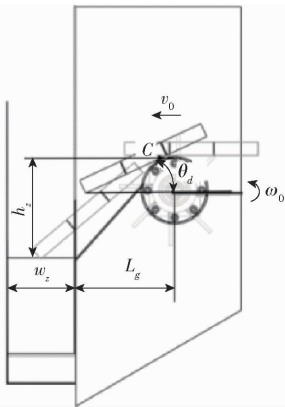


图 5 甘蔗脱离供种辊运动分析

Fig.5 Movement analysis of sugarcane separating from supply roller

由于甘蔗是大长径比杆状材料,下落后长轴与水平面形成下落角度 δ ,影响甘蔗的转动力矩。

设甘蔗脱离供种辊的角度为 θ_d ,即甘蔗脱离瞬间其长轴与水平面的夹角为 θ_d 。假设没有相对滑动,则甘蔗质心的线速度等于供种辊的表面线速度 v_0 。

下落角度为

$$\delta = \theta_d + \omega_0 t_f \tag{19}$$

式中 t_f ——甘蔗在空中的运动时间,s

ω_0 ——供种辊角速度,($^\circ$)/s

甘蔗在空中的运动时间由落种高度和斜槽宽度决定。当斜槽宽度足够大,甘蔗未碰到斜槽挡板就与斜槽底板碰撞,则

$$\begin{cases} h_d = v_{dy} t_f + \frac{1}{2} g t_f^2 \\ h_d = h_z - R_s + R_s \cos\theta_d \\ v_{dy} = v_0 \sin\theta_d \end{cases} \tag{20}$$

式中 h_d ——甘蔗脱离供种辊点 C 与斜槽顶端的距离,mm

v_{dy} ——甘蔗脱离供种辊时在竖直方向上的速度,mm/s

计算得到甘蔗的下落角度为

$$\delta = \theta_d + \omega_0 \frac{v_0 \sin\theta_d + \sqrt{(v_0 \sin\theta_d)^2 + 2g(h_z - R_s + R_s \cos\theta_d)}}{g} \tag{21}$$

当斜槽宽度较小,甘蔗未下落到斜槽底板前先与挡板碰撞,忽略挡板与甘蔗的摩擦力,挡板仅限制杆件的横向位置而不影响其沿辊筒切向的运动,此时挡板对甘蔗的切向运动和自转运动的影响可以忽略,则

$$v_0 t_f = L_g + w_z \tag{22}$$

式中 L_g ——供种辊质心与斜槽右壁面的距离,取 120 mm

w_z ——斜槽宽度,mm

计算得到甘蔗的下落角度为

$$\delta = \theta_d + \omega_0 \frac{L_g + w_z}{v_0} \tag{23}$$

根据式(21)可知,下落角度与落种高度 h_z 相关,由式(23)可知,下落角度与斜槽宽度 w_z 相关。

2.4 落种高度和斜槽宽度

为保证甘蔗下落后能碰撞斜槽底板并转向,甘蔗重心偏移后下落点应在斜槽上,则应满足

$$\sqrt{L_g^2 + h_z^2} \geq \frac{l}{2} \tag{24}$$

计算得到下落高度 $h_z \geq 90$ mm。

甘蔗下落后与斜槽底板碰撞,初步转向,在斜槽底板上处于初步转向状态,甘蔗与斜槽的挡板碰撞,

如图 6 所示。为了使甘蔗能在斜槽上与挡板接触而进行二次碰撞转向,设甘蔗进入斜槽的水平初速度为 v_0 ,忽略摩擦力,则有

$$\begin{cases} x_1 = v_0 t \cos \theta_d \\ y_1 = v_0 t \sin \theta_d + \frac{1}{2} g (\sin \theta_z - \mu \cos \theta_z) t^2 \end{cases} \quad (25)$$

式中 x_1 ——甘蔗质心在 X 方向上的运动距离,mm
 y_1 ——甘蔗在斜槽底板上的运动距离,mm
为保证甘蔗有足够的运动行程,斜槽底板长度大于等于甘蔗长度 300 mm,则 $y_1 \leq 300$ mm。

将 v_0 、 θ_z 和 μ 代入式(25)得到 $x_1 \leq 48$ mm。

当甘蔗以纵向进入斜槽,所需斜槽宽度最大,为了使甘蔗在斜槽中顺利转向,应满足 $w_z \leq l + x_1$,且本文甘蔗的长度取 300 mm,则 $w_z \leq 348$ mm。

甘蔗下落过程不堵塞,则甘蔗贴壁面绕供种箱上点 D 旋转的力臂 l_z 应大于 $l/2$,如图 7 所示,即

$$\sqrt{\left(\frac{w}{2} \tan \theta_z + \frac{d_{ave}}{2}\right)^2 + w_z^2} > \frac{l}{2} \quad (26)$$

计算得到 $w_z > 136$ mm。因此,后续试验选择 w_z 范围为 150 ~ 300 mm。

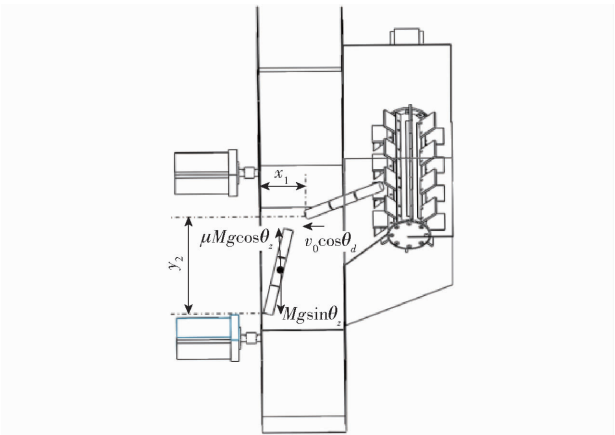


图 6 甘蔗碰撞斜槽底板后运动图

Fig. 6 Motion diagram of sugarcane after collision with chute base plate

3 碰撞仿真试验

根据 2.1 节可知,甘蔗下落至斜槽碰撞的转向力矩与斜槽底板角度、下落角度、甘蔗下落高度有关,因此,对甘蔗下落碰撞斜槽的过程进行仿真分析。

3.1 仿真模型

为明确甘蔗碰撞过程中斜槽底板角度、甘蔗下落角度及下落高度对转向性能的影响,利用离散元软件 EDEM 建立了甘蔗与斜槽底板的碰撞简化模型。该模型以长径比为 10 的甘蔗为代表,重点考察

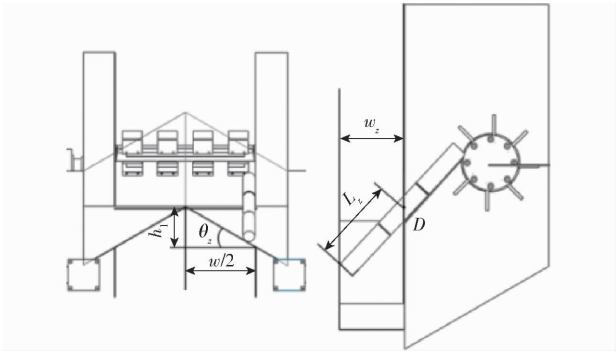


图 7 甘蔗绕点 D 旋转时结构图

Fig. 7 Structural diagram of sugarcane rotating around point D

碰撞过程中的法向力与力矩变化。模型的几何关系如图 8 所示,展示了甘蔗与斜槽的相对位置及碰撞条件。材料参数^[20]如表 1 所示。甘蔗以一定的角度下落,并与斜槽底板发生碰撞,由于碰撞法向力、切向力不通过甘蔗质心,甘蔗在碰撞力的作用下发生偏转,因此,碰撞后甘蔗沿斜槽底板上方反弹并进行旋转,只取第 1 次碰撞的力和力矩进行分析。

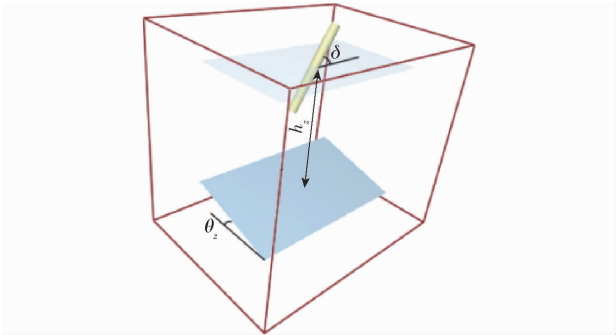


图 8 甘蔗与斜槽底板碰撞模型

Fig. 8 Collision model between sugarcane and chute base plate

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
甘蔗-45 号钢静摩擦因数	0.190
甘蔗-甘蔗滚动摩擦因数	0.035
甘蔗-45 号钢滚动摩擦因数	0.057
甘蔗-甘蔗弹性恢复系数	0.426
甘蔗-45 号钢弹性恢复系数	0.351
甘蔗密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 100
45 号钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
甘蔗泊松比	0.330
45 号钢泊松比	0.344
甘蔗剪切模量/Pa	9.28×10^9
45 号钢剪切模量/Pa	7.00×10^{10}

由于仿真软件的力矩为固定坐标系下的三轴分量,为分析运动坐标系下的甘蔗转动过程,需对力矩进行转化。

$$\begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \mathbf{T}^T \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中 $\mathbf{T}$ ——从局部坐标系到全局坐标系的正交变换矩阵, 满足 $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$

3.2 甘蔗碰撞转向瞬态响应分析

当 $h_z = 0.3 \text{ m}$ 、 $\delta = 30^\circ$ 时, 在不同斜槽底板角度 θ_z 下甘蔗碰撞过程所受法向力及力矩三轴分量的变化过程如图 9 所示。由图 9a 可知, 甘蔗与斜槽底板的接触时间基本相同, $t_r \approx 45 \text{ }\mu\text{s}$, 不随接触角度的变化而变化。最大法向碰撞力随斜槽底板角度的增大

而减小, 可以看出, 斜槽底板的角度影响甘蔗碰撞运动过程。由图 9b 可知, L_z 较小, 且 L_z 不影响甘蔗的横向转动, 甘蔗的横向转动主要取决于转动力矩 L_x 、 L_y , 因此, 后续只讨论 L_x 、 L_y 。由图 9c 可知, L_x 的峰值在负方向上随 θ_z 的增大呈先增大后减小的趋势, 转动力矩 L_x 在负方向存在极大值, 其极大值出现在 θ_z 为 $35^\circ \sim 50^\circ$ 时。由式 (11) 可知甘蔗力矩 L_y 与斜槽底板角度相关, 由图 9d 可知, 力矩 L_y 随 θ_z 的增大呈先增大后减小的趋势, 转动力矩 L_y 的最大值出现在 θ_z 为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 时。因此, 在单因素试验分析中, 扩大参数范围, 选择斜槽底板角度 θ_z 为 $15^\circ \sim 55^\circ$ 。

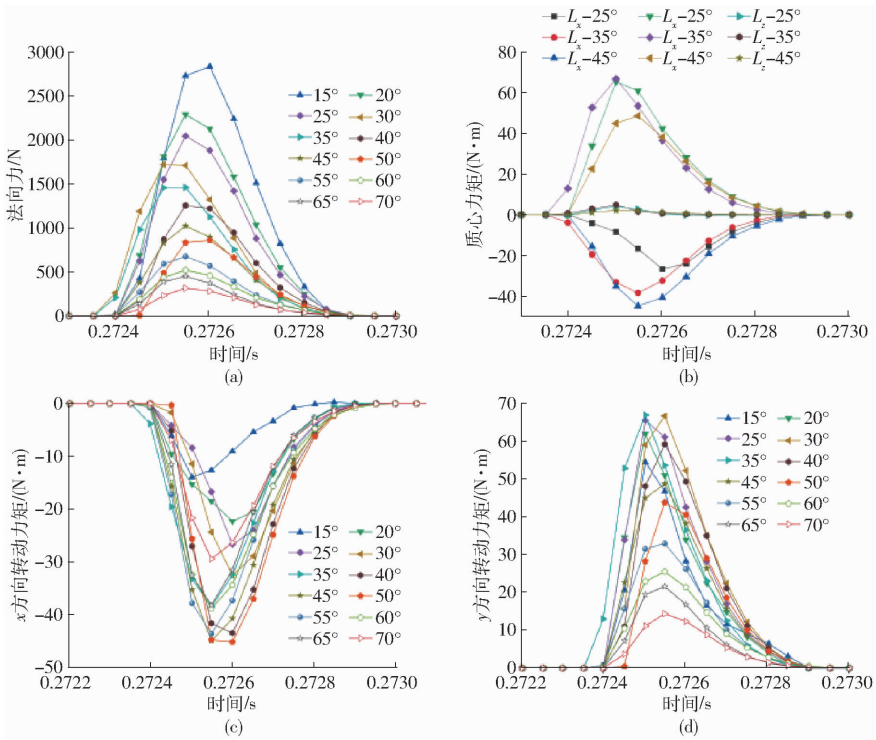


图 9 力、力矩和斜槽底板角度关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of force, torque, and angle of chute base plate

当 $\theta_z = 35^\circ$ 、 $\delta = 30^\circ$ 时, 不同下落高度下甘蔗碰撞过程所受碰撞力及 L_x 、 L_y 的变化过程如图 10 所示 (图中负号表示方向)。考虑整机高度, 因此选择下落高度为 $100 \sim 500 \text{ mm}$ 进行碰撞分析。甘蔗转向取决于第 1 次碰撞, 为方便分析, 只取

第 1 次碰撞的法向力及力矩。由图 10a 可知, 法向碰撞力峰值随 h_z 的增大而线性增大, 因此, h_z 直接影响甘蔗碰撞运动过程, 进而影响甘蔗的转向性能。由图 10b、10c 可知, 甘蔗碰撞过程力矩 L_x 、 L_y 的峰值随 h_z 的增大而线性增大。后续试验

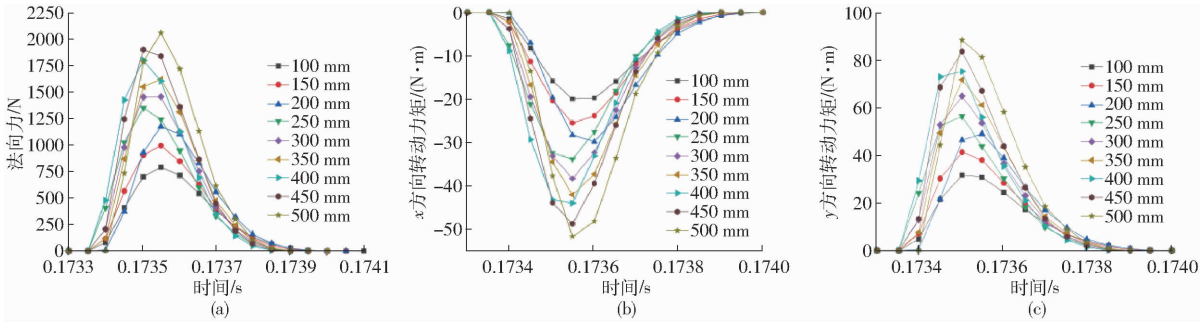


图 10 力、力矩与下落高度关系曲线

Fig. 10 Relationship curves of force, torque, and drop height

分析中,应充分考虑下落高度 h_z 对甘蔗横向的影响。

当 $\theta_z = 35^\circ$ 、 $h_z = 0.3\text{ m}$ 时,甘蔗不同下落角度的碰撞力及力矩分量 L_x 、 L_y 变化过程如图 11 所示。由图 11a 可知,增大下落角度会提升法向碰撞力峰值,

该变化趋势直接作用于碰撞过程,是决定甘蔗转向性能的关键。由图 11b 可知,甘蔗碰撞过程力矩 L_x 的峰值随下落角度的增大而先增大后减小, L_x 在下落角度 $\delta = 60^\circ$ 时达到最大值。由图 11c 可知,力矩 L_y 的峰值随下落角度的增大而减小。

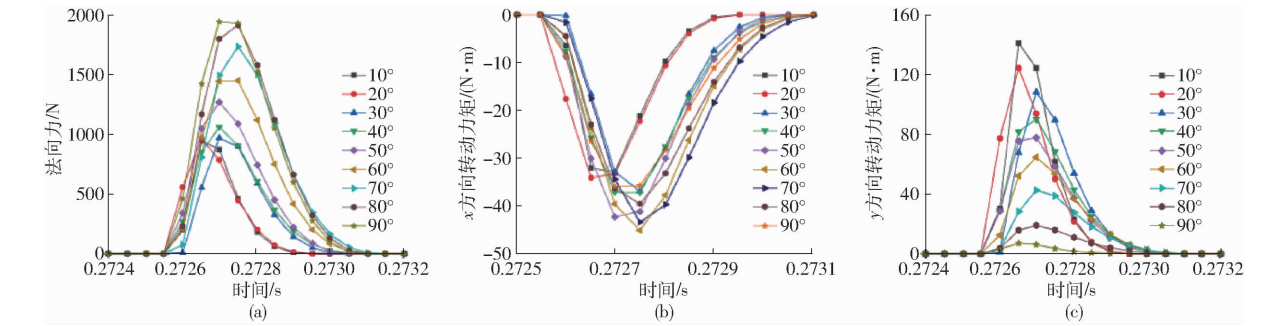


图 11 碰撞力、力矩与下落角度关系曲线

Fig. 11 Relationship curves of collision force, torque, and falling angle of cane

根据甘蔗与斜槽底板的碰撞力学分析,以及基于离散元仿真的碰撞瞬态过程分析可知,斜槽底板角度、下落高度和下落角度通过改变转向力矩,成为影响甘蔗在斜槽中转向有序性的主要因素。根据 2.3 节可知,甘蔗的下落角度与下落高度及斜槽宽度有关,因此,为了深入研究各因素对横向供种性能的影响,通过搭建试验平台,分析斜槽底板角度、下落高度和斜槽宽度对斜槽横向供种性能的影响,并确定最佳参数组合。

4 台架试验

为探究供种装置结构参数对横向供种性能影响,开展斜槽横向供种性能试验。建立供种性能指标与斜槽横向供种试验参数间数学模型,进行主要因素的显著性分析,综合评价供种装置的作业性能。

4.1 试验材料及平台

试验平台如图 12 所示,主要由供种箱、振动电机(安装在供种箱底部)、供种辊、转向斜槽、传送带、集蔗箱、步进电机、步进电机控制器、三相电机和变频调速器组成。斜槽转向供种装置如图 13 所示,由倒 V 型斜槽底板、挡板和横向输送带等组成,甘蔗转向后分别左右两行对称输送,为了试验简便,只进行一行甘蔗输送试验探究甘蔗的横向转向性能。

4.2 试验方法及指标

利用自制的供种试验平台,研究在不同下落高度、斜槽宽度和斜槽底板角度对转向性能的影响。本文试验由单因素试验和 Box - Behnken Design 两部分组成。试验时无序甘蔗放置在供种箱中,振动电机提供振动频率,步进电机驱动供种辊,横向输送带由三相异步电动机驱动。供种过程甘蔗的状态由摄像机进行拍摄。利用摄像技术,可观测到甘蔗从

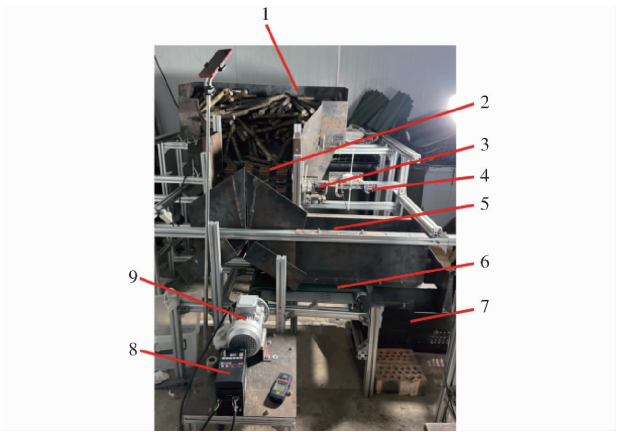


图 12 试验平台

Fig. 12 Test platform

1. 供种箱 2. 供种辊 3. 步进电机 4. 步进电机控制器 5. 空间转向斜槽 6. 横向输送带 7. 集蔗箱 8. 变频调速器 9. 三相电机

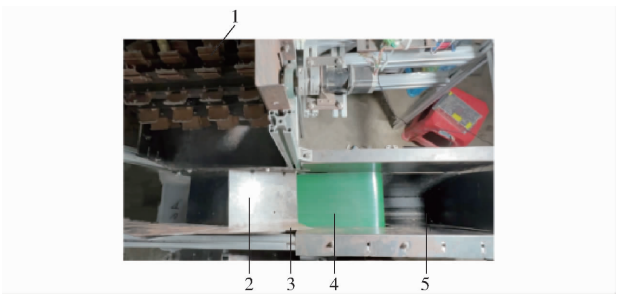


图 13 斜槽转向供种装置

Fig. 13 Directional chute seed supply device

1. 供种辊 2. 斜槽底板 3. 挡板 4. 横向输送带 5. 集蔗箱

供种辊下落后的转向过程及转向状态。提取不同下落高度、斜槽宽度和斜槽底板角度下的摄像图,开展甘蔗转向过程的对比分析。

为保证供种质量,以转向合格率作为性能指标。甘蔗与横向输送带输送方向的夹角小于 30° 的甘蔗认为转向合格^[25],为横向排序状态,否则认为不合

格,为纵向排序状态。以横向排序状态的甘蔗所占的比例作为转向装置转向合格的标准。统计时,逐帧慢放试验视频,为了减少工作量,对于与横向夹角明显小于 30°的甘蔗,记录为转向合格甘蔗,部分不易直观判断的甘蔗,采用二次处理测量图像角度来判断是否转向合格,统计并计算转向合格率,公式为

$$f_z = \frac{n_z}{m_g} \times 100\%$$

(28)

式中 f_z ——转向合格率,%
 n_z ——转向合格甘蔗数量,根
 m_g ——甘蔗数量,根

4.3 单因素试验结果

4.3.1 斜槽底板角度对横向供种性能的影响

设定 w_z 为 200 mm、 h_z 为 300 mm。斜槽底板角度 θ_z 对转向合格率的影响试验结果如图 14a 所示,转向状态如图 15 所示。

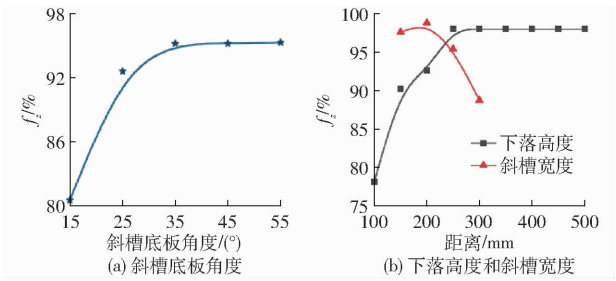


图 14 各因素与转向合格率关系曲线

Fig. 14 Relationship curves of each factor and steering pass rate

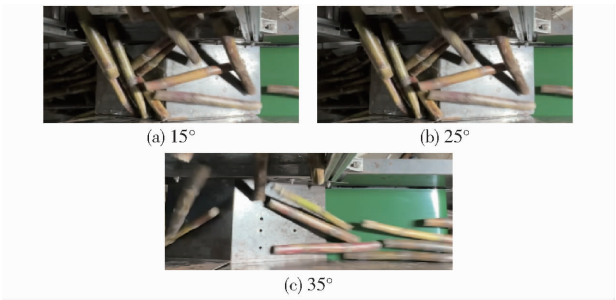


图 15 不同斜槽底板角度下的转向状态

Fig. 15 Turning state of different angles of chute base plate

图 14a 表明,在 θ_z 为 15°~55°时,转向合格率随斜槽底板角度的增大呈上升后趋于平稳的趋势,当斜槽底板角度大于 35°时转向合格率趋于稳定。考虑减小供种装置重心,后续 Box - Behnken Design 试验选择 θ_z 为 15°~35°。

4.3.2 下落高度对横向供种性能的影响

设定 w_z 为 200 mm、 θ_z 为 35°。100~500 mm 的下落高度 h_z 对转向合格率的影响试验结果如图 14b 所示,转向状态如图 16 所示。

图 14b 表明,在 100~500 mm 下落高度范围内,随着 h_z 的增大,转向合格率呈上升后趋于稳定的趋

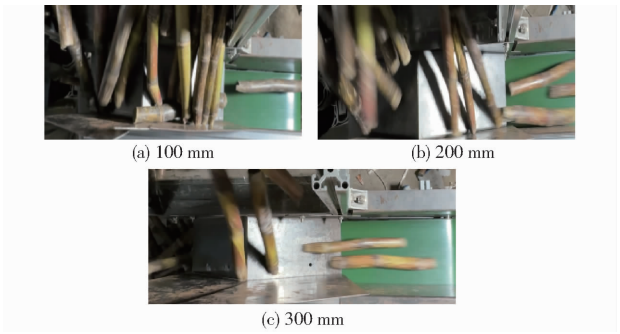


图 16 不同下落高度下的转向状态

Fig. 16 Turning state of different drop heights

势,当 h_z 大于 250 mm 时,转向合格率趋于稳定。 h_z 为 100 mm 时,转向合格率极低,仅为 79.8%,甘蔗的状态如图 16a 所示, h_z 过小,甘蔗转向力不足,下落能量不足,落入斜槽后甘蔗无法完成转向,极易造成堆积堵塞,进而降低转向合格率, h_z 应大于 100 mm。根据式 (10) 可知,转向法向力和转向力矩随 h_z 的增大而增大。 h_z 越小,法向力和转向力矩越小,使甘蔗不易转向; h_z 越大,法向力和转向力矩越大,使甘蔗转向越稳定,理论与试验分析相符。因此,后续 Box - Behnken Design 试验选择 h_z 为 150~300 mm。

4.3.3 斜槽宽度对横向供种性能的影响

设定 h_z 为 300 mm、 θ_z 为 35°。斜槽宽度 w_z 对转向合格率的影响试验结果如图 14b 所示,转向状态如图 17 所示。

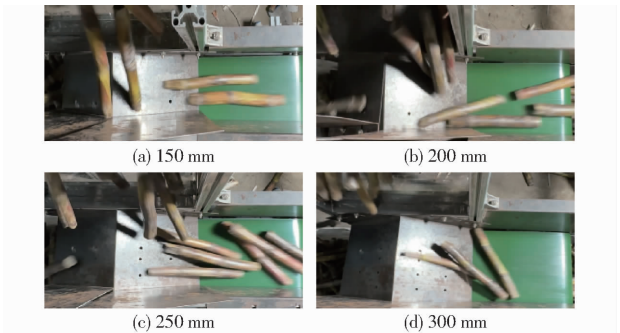


图 17 甘蔗在不同斜槽宽度下的转向状态

Fig. 17 Turning state of sugarcane in different widths of chute

图 14b 表明,在斜槽宽度为 150~300 mm 时,转向合格率随斜槽宽度的增大呈先上升后下降的趋势。当斜槽宽度为 300 mm 时,转向合格率急剧下降,仅为 88.7%,此时斜槽宽度达到甘蔗长度,甘蔗有足够的空间转为纵向,降低转向合格率。斜槽宽度 300 mm 时甘蔗的状态如图 17d 所示,此时部分甘蔗转为纵向而不能满足横向输送要求,因此,斜槽宽度应小于 300 mm,即甘蔗长度。由图 17 可知,甘蔗因空间的约束沿斜槽流动方向排序,在斜槽宽度为 150~250 mm 时转向合格率较高,达到 95% 以上。后续试验选择斜槽宽度为 150~250 mm。

4.4 Box – Behnken 试验结果

本文利用 Box – Behnken 试验,对斜槽底板角度、下落高度以及斜槽宽度三因素进行响应面法优化,确定最佳甘蔗定向参数。各因素编码见表 2。

表 2 Box – Behnken 试验因素编码

Tab.2 Factor codes for Box – Behnken experiment			
编码	试验因素		
	$\theta_z/(\text{ }^\circ)$	h_z/mm	w_z/mm
-1	15	150	150
0	25	225	200
1	35	300	250

采用二阶多项式回归模型方程分析和优化转向合格率(f_z)。试验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果
Tab.3 Test result

试验 序号	试验因素			转向合格率/%				
	$\theta_z/(\text{ }^\circ)$	h_z/mm	w_z/mm	1	2	3	均值	标准差
1	25	150	150	49.6	50.3	50.7	50.2	0.45
2	25	300	150	93.4	94.3	94.6	94.1	0.51
3	25	150	250	89.5	89.5	91.6	90.2	0.99
4	25	300	250	94.7	95.3	95.6	95.2	0.37
5	15	150	200	26.8	26.7	27.4	27.0	0.31
6	15	300	200	59.1	60.8	60.0	60.0	0.69
7	35	150	200	94.3	94.8	95.8	95.0	0.62
8	35	300	200	98.9	98.6	99.4	99.0	0.33
9	15	225	150	19.4	19.6	21.0	20.0	0.71
10	15	225	250	46.4	46.6	48.1	47.0	0.76
11	35	225	150	92.0	93.5	93.5	93.0	0.71
12	35	225	250	95.0	95.2	95.4	95.2	0.16
13	25	225	200	95.8	96.6	96.8	96.4	0.43
14	25	225	200	91.2	93.0	91.8	92.0	0.75
15	25	225	200	94.6	95.6	95.4	95.2	0.43
16	25	225	200	92.6	93.4	93.6	93.2	0.43
17	25	225	200	91.0	91.4	90.6	91.0	0.33

利用 Design-Expert 软件分析转向合格率。对 BBD 试验结果进行多元回归分析,得到回归方程为

$$f_z = -570.99 + 1.09h_z + 2.48w_z + 17.99\theta_z - 0.002\,6h_zw_z - 0.009\,7h_z\theta_z - 0.012\,4w_z\theta_z - 0.000\,4h_z^2 - 0.003\,5w_z^2 - 0.209\,7\theta_z^2 \quad (29)$$

一阶系数反映了各因素对转向合格率的影响情况,其绝对值大小反映了影响程度。 R^2 值表明了模型的拟合精度,在该拟合模型中,转向合格率的 R^2_{adj} 为 0.99,说明回归模型具有较高精度。回归模型的方差分析结果如表 4 所示。 P 值小于 0.000 1 表明模型是显著的,且其失拟度为 0.10,表明不显著,说明该回归方程拟合良好。

表 4 方差分析
Tab.4 ANOVA

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	11 124.0	9	1 236	107.5	<0.000 1 **
h_z	922.4	1	922.4	80.2	<0.000 1 **
w_z	617.8	1	617.8	53.7	0.000 2 **
θ_z	6 509.4	1	6 509.4	566.2	<0.000 1 **
h_zw_z	378.3	1	378.3	32.9	0.000 7 **
$h_z\theta_z$	210.3	1	210.3	18.3	0.003 7 **
$w_z\theta_z$	153.8	1	153.8	13.4	0.008 1 **
h_z^2	23.1	1	23.1	2.0	0.199 2
w_z^2	325.5	1	325.5	28.3	0.001 1 **
θ_z^2	1 851.1	1	1 851.1	161.0	<0.000 1 **
失拟项	60.6	3	20.2	4.1	0.104 4
纯误差	19.9	4	5.0		
合计	11 204.5	16			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

根据方差分析,对于转向合格率、下落高度的一次项,斜槽宽度的一、二次项,斜槽底板角度一、二次项,下落高度与斜槽宽度交互项,下落高度与斜槽底板角度的交互项,以及斜槽宽度与斜槽底板角度交互项达到显著水平。对转向合格率影响的显著程度由大到小为:斜槽底板角度、下落高度、斜槽宽度。斜槽底板角度的显著性要高于其他项,这表明斜槽底板角度对转向合格率的影响更显著。

3 种试验因素对转向合格率交互影响的响应面如图 18 所示。图 18a 表明,随着下落高度的增加,转向合格率上升,随着斜槽宽度的增加,转向合格率呈先上升后下降的趋势。图 18b 表明,随着斜槽底板角度和下落高度的增加,转向合格率上升。图 18c 表明,随着斜槽宽度的增加,转向合格率呈先上升后下降的趋势,随着斜槽底板角度的增大,转向合格率增大。

利用 Design-Expert 软件进行试验最优结果预测,转向合格率的下限和上限分别设置为 98% 和 100%。结果表明,下落高度为 296.5 mm,斜槽宽度为 214.9 mm,斜槽底板角度为 34.9°,此时转向合格率达到最大值,为 99%。

在最优条件工况下,进行甘蔗破损重复性试验,经 3 次重复试验并取平均值,获得甘蔗的平均破损率为 0,验证了该参数下供种转向的可靠性。

对优化后的结构参数组合进行验证试验,试验方法和指标与前述一致。验证试验结果表明,最优预测参数下的转向合格率为 98.4%,与预测值的误差仅为 0.6 个百分点,因此,拟合模型准确可靠。

5 讨论

本文针对甘蔗横向播种器供种过程中存在的转

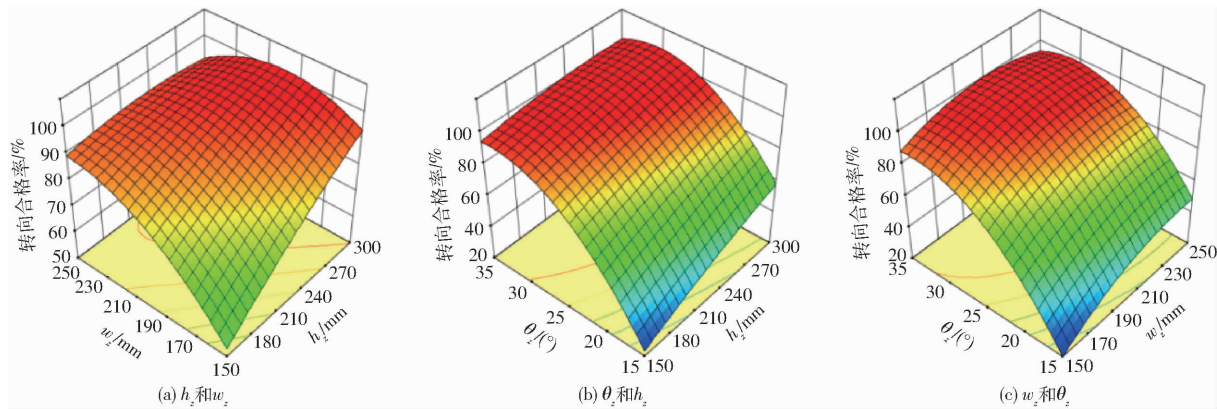


图 18 因素交互作用对转向合格率影响的响应面

Fig. 18 Response surfaces of effect of factor interactions on turning qualification rate

向精度低、效率低、易卡滞等问题,提出了一种基于斜槽转向的供种装置,并系统开展了理论建模、离散元仿真与台架试验研究,试验转向合格率 98.4%,验证了该装置在实现甘蔗横向有序供种方面的有效性。

尽管斜槽转向供种装置在试验中表现出良好的转向性能,但仍存在以下局限。例如:本研究主要基于台架试验,尚未开展田间实际工况下的性能验证,斜槽在复杂振动与负载条件下的适应性仍需进一步评估;试验所用甘蔗段直径较为均匀,未充分考虑实际生产中甘蔗形状不规则性对转向性能的影响;当前装置缺乏对供种过程的实时感知与调控能力,难以应对播种速度和供种流量波动情况。

6 结论

(1) 针对甘蔗横向种植机人工播种劳动强度大、供种连续性差及姿态无序等问题,提出了一种基

于斜槽转向的横向供种方法,实现了甘蔗从无序到横向有序的自动转换,有效提高了供种质量和作业连续性。

(2) 通过建立甘蔗-斜槽碰撞力学模型,揭示了斜槽底板角度、下落高度和斜槽宽度对转向力矩的影响机制;基于离散元法的仿真分析进一步验证了该结构在实现有序转向方面的可行性。

(3) 单因素试验表明,转向合格率随下落高度和斜槽底板角度的增大而提高,随斜槽宽度的增大呈先升后降趋势;为减少堵塞、保证稳定转向,斜槽宽度不宜超过甘蔗长度。

(4) 响应面优化结果表明,各因素对转向合格率的影响由大到小为:斜槽底板角度、下落高度、斜槽宽度。最优参数组合为:斜槽底板角度 34.9°、下落高度 296.5 mm、斜槽宽度 214.9 mm,此时转向合格率达 98.4%,与预测值误差仅为 0.6 个百分点,表明模型具有较高预测精度与工程适用性。

参 考 文 献

[1] 麻芳兰, 苗金泽, 樊广坤, 等. 丘陵地区甘蔗种植机仿形覆土器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 26-36.
Ma Fanglan, Miao Jinze, Fan Guangkun, et al. Design and test of a contour-following soil cover device for sugarcane planters in hilly areas[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(2): 26-36. (in Chinese)

[2] 麻芳兰, 叶凤滋, 蔚延涛, 等. 横向摆种蔗段种植机隔板带式播种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(3): 186-195.
Ma Fanglan, Ye Fengzi, Yu Yantao, et al. Design and experiment of conveyor belt seeder with partition for sugarcane transversal planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 186-195. (in Chinese)

[3] 李尚平, 李鑫志, 文春明, 等. 双芽蔗段横向种植机沟深控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 22-32.
Li Shangping, Li Xinzhi, Wen Chunming, et al. Tillage depth control system for double-bud cane section transverse planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 22-32. (in Chinese)

[4] Ripolim L C, Ripoli T C C, Tomaz C C. Evaluation of five sugar cane planters[J]. Engenharia Agrícola, 2010, 30(6): 1110-1122.

[5] Compagnon A M, Furlani C E A, Da Silva R P, et al. Billet metering mechanism of a sugarcane planter[J]. African Journal of Agricultural Research, 2016, 11(38): 3643-3650.

[6] Abbasian B, Ferdavani M K, Dizaji H Z. Design, construction, and evaluation of an automatic feeder control system for sugarcane billet planters[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2024, 14(4): 459-474.

- [7] Compagnon A M, Da Silva R P, Furlani C E A, et al. Operational uniformity for a sugarcane planter[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2017, 12(12): 953–962.
- [8] Taghinezhad J, Alimardani R, Jafari 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, 15(2): 138–147.
- [9] 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, 15(4): 23–29.
- [10] Namjoo M, Razavi J, Khani A. Fabrication and evaluation of a metering device for a sugarcane billet planter[J]. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 25(1): 1–12.
- [11] Thienyaem T, Saengprachatanarug K, Wongpichet S, et al. The influence of the metering device arrangement to the discharging consistency of the sugarcane billet planter[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 931: 1561–1567.
- [12] Saengprachatanarug K, Wongpichet S, Ueno M, et al. Comparative discharge and precision index of a sugar cane billet planter [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2016, 32(5): 561–567.
- [13] Saengprachatanarug K, Chaloeonthoi 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.
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 梁文鹏, 莫建霖, 曾伯胜, 等. 2CZD-1 型段茎式甘蔗种植机设计与试验[J]. *现代农业装备*, 2020, 41(2): 18–26.
Liang Wenpeng, Mo Jianlin, Zeng Bosheng, et al. Design and test of 2CZD-1 billet sugarcane planter [J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2020, 41(2): 18–26. (in Chinese)
- [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 sugarcane planter [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(4): 109–118. (in Chinese)
- [18] Singh S P, Kumar A, Kushwaha H L. Sugar cane canopy spraying: a perspective solution with ergonomics and mechatronics approach[J]. *Sugar Tech*, 2020, 22: 203–207.
- [19] 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 transplanter for pre-cut sugarcane [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 72–81. (in Chinese)
- [20] 钟家勤, 陶利民, 李尚平, 等. 清种补种上提式甘蔗排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(13): 43–54.
Zhong Jiaqin, Tao Limin, Li Shangping, et al. Design and experiments of a seed clearing, reseeding and elevating type seed metering device for sugarcane[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(13): 43–54. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] Siliveru K, Ambrose R K, Vadlani P V. Significance of composition and particle size on the shear flow properties of wheat flour [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(8): 2300–2306.
- [23] 刘洋, 毛罕平, 王涛, 等. 吊杯式移栽机构中番茄穴盘苗运动分析优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 143–151.
Liu Yang, Mao Hanping, Wang Tao, et al. Collision optimization and experiment of tomato plug seedling in basket-type transplanting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 143–151. (in Chinese)
- [24] 李海同. 油菜联合收获机分体组合式割台与定向输送装置研制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
Li Haitong. Development on separating-combined header and directional conveying device of rape combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 向锐. 预切种式甘蔗种植机连续供种系统的设计与试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
Xiang Rui. Design and experimental study on continuous feeding system of pre cutting sugarcane planter [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)