

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.016

基于有效落种空间的甘蔗横向种植机开沟器设计与试验

李尚平^{1,2} 潘家枫¹ 钟家勤^{1,3} 黄宗晓¹ 甘芳芳¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西民族大学电子信息学院, 南宁 530006;
3. 北部湾大学机械与船舶海洋工程学院, 钦州 535011)

摘要: 针对甘蔗横向种植对落种质量要求高的问题,基于有效落种空间形成条件,设计了一种组合式甘蔗横向种植开沟器,主要由防漏犁、旋耕部件和开沟犁构成。通过分析落种运动与土壤运动规律,确定影响落种效果的因素以及各关键部件的结构参数。以旋耕转速、工作深度和前进速度为试验因素,以有效落种深度、旋耕功耗和开沟阻力为试验指标开展田间正交试验,探究作业参数对开沟器性能的影响规律。试验结果表明,工作深度对有效落种深度、旋耕功耗和开沟阻力有极显著影响;旋耕转速对旋耕功耗有极显著影响;前进速度对旋耕功耗有显著性影响。使用较优作业参数组合进行验证性试验的结果表明,在旋耕转速为 200 r/min、工作深度为 30 cm 和前进速度为 1.20 m/s 时,有效落种深度为 29.9 cm,落种深度稳定性系数为 97.6%,覆土厚度为 8.8 cm,浮土厚度为 3.4 cm,旋耕功耗为 34.0 kW,单侧开沟阻力为 14.1 kN,开沟器性能指标满足甘蔗横向种植的落种要求。

关键词: 甘蔗; 横向种植机; 有效落种空间; 开沟器

中图分类号: S223.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0162-09 OSID: 

Design and Experiment of Furrow Opener for Transversal Sugarcane Planter Based on Effective Seeding Space

LI Shangping^{1,2} PAN Jiafeng¹ ZHONG Jiaqin^{1,3} HUANG Zongxiao¹ GAN Fangfang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China
2. College of Electronic Information, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China
3. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: Aiming at the high requirements of seed quality for sugarcane transversal planting, a combined furrow opener for transversal planting of sugarcane was designed based on the formation conditions of effective seeding space. The furrow opener designed included leak-proof plough, rotary tillage unit and furrow plough. The influencing factors of seeding effect and structural parameters were confirmed via analysis of seeding and soil movement law. Rotary tillage speed, working depth, and forward speed were used as factors, and the effective seeding depth, energy consumption of rotary tillage, and furrowing resistance were employed as indexes. The influence rules of working parameters on the furrow opener performance were studied by a three-factor and three-level field orthogonal experimental design. Results showed that working depth significantly influenced the effective seeding depth, energy consumption of rotary tillage, and furrowing resistance. Moreover, rotary tillage speed significantly influenced the energy consumption of rotary tillage, whereas forward speed significantly affected the energy consumption of rotary tillage. Thus, the influence of the working depth and rotary tillage speed was extremely significant, but that of forward speed was generally significant. The better parameters were obtained with the rotary tillage speed of 200 r/min, the working depth of 30 cm, and the forward speed of 1.20 m/s. The field verification experiment results with better parameters showed that the effective seeding depth was 29.9 cm, the stability of seeding depth was 97.6%, the thickness of covering soil was 8.8 cm, the thickness of regolith was 3.4 cm, the energy consumption of rotary tillage was 34.0 kW, and the unilateral furrowing resistance was 14.1 kN. The indicators could meet the requirements of sugarcane transversal planting.

Key words: sugarcane; transversal planter; effective seeding space; furrow opener

收稿日期: 2021-07-23 修回日期: 2021-08-25
基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB18281016)、国家自然科学基金项目(52165009)和广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2020035)
作者简介: 李尚平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事甘蔗机械研究,E-mail: spli501@vip.sina.com

0 引言

甘蔗是我国主要的糖料作物,蔗糖产量约占全国食糖产量的 90%。广西地区作为我国的甘蔗主产区,种植面积占全国的 60% 以上。但是,由于地形等条件限制,甘蔗种植的综合机械化率约 55%,并主要以纵向种植方式为主^[1]。为了减少甘蔗种植的用量,推广甘蔗良种良法技术,农艺专家提出了双芽段甘蔗横向种植模式。与传统的纵向种植模式相比,耗种量减少 50% ~ 60%,并且分蘖能力强,出芽率较高。但是,横向种植对于落种质量要求高,作业时要求蔗种“深种浅埋”,即种植深度大于 28 cm,蔗种落地时保持横向姿态,有利于蔗种扎根,提高抗倒伏能力和延长宿根年限^[2-5]。

由种植作业过程可知,开沟部件的作业效果是种植深度与落种形态能否达到农艺要求的关键因素。目前,研究人员根据甘蔗种植要求对开沟部件进行了设计与研究。韩杰等^[6]设计了一种带弧形挡板的甘蔗种植机开沟覆土装置,可以引导甘蔗种顺利进入种植沟,并对直线型、凹型和凸型 3 种不同切削刃类型的开沟性能进行试验,结果表明,凸型开沟器的开沟效果较好。夏利利等^[7]设计了一种 W 形开沟器,可以使甘蔗种落下时隔开一定横向距离,避免蔗种扎堆,并能减小开沟器的工作阻力。张国庆等^[8]针对种肥分施的要求,设计了一种种肥隔离式开沟器,并对主要结构参数进行理论和受力分析,确定了最佳入土角、张角、外倾角和幅宽。SINGH 等^[9]探究了开沟器类型、开沟深度和前进速度对垄高、甘蔗发芽率和土壤扰动特性等指标的影响,得到了较佳的开沟器类型与工作参数。目前,国内外研究人员关于甘蔗种植机开沟部件的研究主要集中在纵向种植方面,对横向种植开沟器的研究较少,并且结合落种过程的研究更少。

为此,根据横向种植对开沟落种提出的要求,本文通过分析落种与土壤运动关系,基于有效落种空间形成的要求,设计一种适用于甘蔗横向种植的组合式开沟器,以满足甘蔗横向种植的落种要求,提高横向种植机的落种质量。

1 开沟器开沟原理分析

1.1 预切种式甘蔗横向种植机工作原理

预切种式甘蔗横向种植机如图 1 所示,主要由组合式开沟器、播种器、施肥和覆土覆膜等机构组成。工作时拖拉机输出动力驱动组合式开沟器旋耕切削土壤,随着拖拉机拉动种植机前进和三点悬挂调节工作高度,开沟器切入形成种植沟,地轮提供动

力给播种器和施肥机构,按一定频率横向排出蔗种和肥料,最后覆土覆膜,完成双行开沟、播种、施肥、覆土覆膜等甘蔗种植工序。

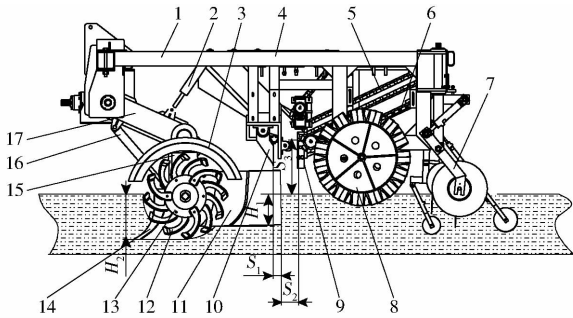


图 1 预切种甘蔗横向种植机结构简图

Fig. 1 Structural diagram of transversal sugarcane planter

1. 机架 2. 开沟器上液压缸 3. 挡泥板 4. 播种器集蔗箱
5. 播种器一级提升链 6. 播种器二级输送链 7. 覆土覆膜机构
8. 地轮 9. 播种器落种点 10. 螺旋施肥机构 11. 开沟犁 12. 旋耕刀 13. 旋耕刀盘 14. 防漏犁 15. 开沟器下臂 16. 开沟器下液压缸 17. 开沟器上臂

1.2 横向种植落种农艺要求

如图 2 所示,双芽段甘蔗横向种植时要求将蔗种横向放入种植沟内,蔗种之间水平距离 d_s 为 30 ~ 40 cm,开沟宽度 $w_1 \geq 35$ cm,有利于通风与采光,便于后续的中耕培土和机械化收获。种植截面如图 3 所示,根据“深种浅埋”的要求,蔗种底部至地表面的深度,即种植深度 $H_p \geq 28$ cm,沟底浮土厚度 H_q 为 2 ~ 3 cm,覆土厚度 H_c 为 5 ~ 10 cm。

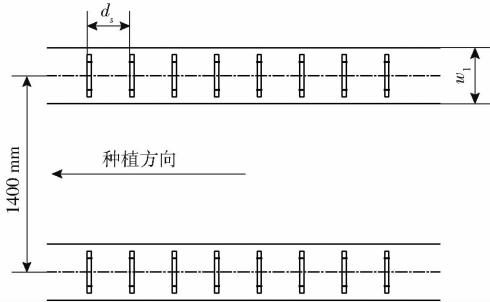


图 2 预切种双芽段甘蔗横向种植位置俯视图

Fig. 2 Top view of transversal double-bud sugarcane planting situation with seed pre-cutting

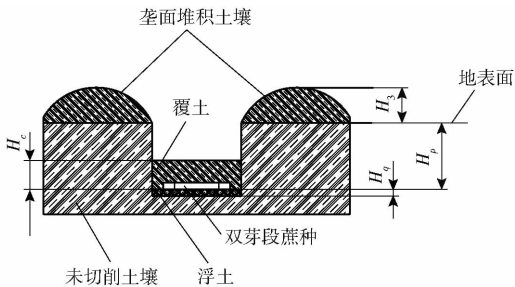


图 3 预切种双芽段甘蔗横向种植截面图

Fig. 3 Sectional view of double-bud sugarcane planting with seed pre-cutting

1.3 有效落种空间形成机理分析

开沟作业之后,垄上堆积的土壤在重力作用下回填种植沟内是土壤的一种固有特性。土壤回填会增加沟底浮土,并且形成 V 形沟,影响蔗种种植深度和落地姿态。因此,蔗种应在开沟器开沟完成之后、土壤回填之前的极短时间段内落入种沟。此时开沟犁的开沟深度等于种植深度,且落种方向没有改变,才满足落种要求,如图 4 所示。



图 4 有效落种示意图

Fig. 4 Schematic of effective seeding

将蔗种落地姿态保持横向且种植深度达到要求的排种过程称为有效落种,其深度定义为有效落种深度。完成有效落种的前提是在该时间段内开沟器与播种器之间形成一个无土壤回填的瞬时稳定的落种区域,可以保证蔗种下落达到种植深度要求且落种姿态保持横向不改变,将这个区域称为有效落种空间。有效落种的过程分为空间形成、蔗种掉落和土壤回填 3 个阶段,因此,有效落种空间是动态变化的,即播种器不断排出蔗种,有效落种空间不断形成,各阶段有机衔接以完成精准布种。

假设播种器落种点与土壤回填点的水平距离为 S_2 ,机具前进方向为 x 轴正方向,竖直向下为 y 轴正方向,对播种器上单根蔗种做运动学分析,如图 5 所示。

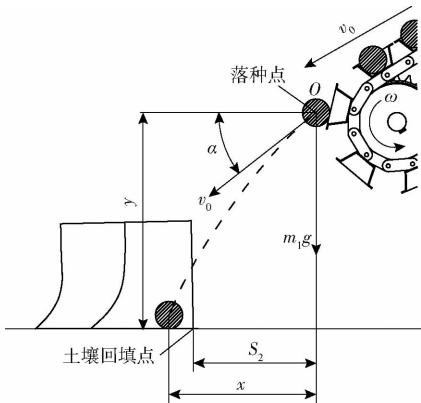


图 5 落种运动分析图

Fig. 5 Motion analysis diagram of seeder

质量为 m_1 的蔗种受到惯性力和重力作用做斜抛运动,运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = (v_0 \cos \alpha + v_m) t_1 \\ y = \frac{1}{2} g t_1^2 + v_0 t_1 \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中 x ——蔗种水平方向抛出距离, m
 y ——落种高度, m
 v_0 ——蔗种离开蔗槽的瞬时速度,定义为初始线速度, m/s
 α ——蔗种初始线速度与 x 轴夹角,定义为落种夹角, ($^\circ$)
 v_m ——种植机前进速度, m/s
 t_1 ——落种时间, s
 g ——重力加速度,取 $9.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$

由于开沟器与播种器均随着整机前进,水平方向的相对速度为零,由式(1)得到蔗种水平方向的抛出距离 x 与落种高度 y 之间的关系方程为

$$y = \frac{g x^2}{2 (v_0 \cos \alpha)^2} + x \tan \alpha \quad (2)$$

由式(2)可知,蔗种抛出距离受到落种高度、初始线速度和落种夹角的影响,当工作深度为 0.3 m 时,落种夹角 $\alpha = 25^\circ$,落种高度 $y = 0.4 \text{ m}$,初始线速度 $v_0 = 0.19 \text{ m/s}$,代入式(2)计算得到抛出距离 $x = 0.064 \text{ m}$ 。因此,为达到深种浅埋的种植要求,基于有效落种空间形成,对开沟器提出以下设计要求:

(1)根据种植深度和沟底细碎浮土厚度要求,开沟器的碎土层深度应达到 35 cm,开沟深度应达到 30 cm,能一次形成有效落种空间,有效落种深度达到 28 cm 以上。

(2)普通双芽段蔗种的长度范围为 25 ~ 35 cm,要实现横向落种姿态不变,种植沟的宽度应大于蔗种长度,沟型截面为长方形,因此开沟宽度 w_1 应在 35 cm 以上。

(3)由图 5 可知,蔗种抛出距离大于或等于落种点与土壤回填点的水平距离,蔗种才能在土壤回填之前落入种沟,即 $S_2 \leq x$,有 $S_2 \leq 6.4 \text{ cm}$ 。

(4)开沟过程中,土壤不能漫过犁面增加沟底浮土,影响种植深度。蔗种落入种植沟后,护板两侧土壤回填形成部分覆土,对土壤的扰动性小,有利于保持土壤和蔗种水分。

2 开沟器关键部件设计

根据上述设计要求,开沟器为组合式设计,主要由防漏犁、旋耕部件和开沟犁构成,分两步完成开沟作业,保证开沟质量。首先由防漏犁与旋耕部件对土壤进行切削粉碎,降低开沟犁开沟阻力,保证碎土深度,并与挡泥板配合作用抛出部分土壤。然后,由开沟犁推动沟内剩余土壤沿犁面导流清理种沟,形

成有效落种空间,并防止土壤回填。

2.1 防漏犁设计

由图 1 可知,防漏犁是开沟器部件中最先切入土壤的部件,随种植机前进切削链轮箱体下方土壤,起土导流至旋耕区。设计防漏犁结构如图 6 所示,导曲线由直线和曲线组成。根据开沟深度确定防漏犁脛刀线高度为 380 mm,其中曲线段曲率半径为 $R_1 = 295\text{ mm}$ 、高度 $h_1 = 275\text{ mm}$,直线段高度 $h_2 = 105\text{ mm}$ 。为减小入土时机具的上抬高度和犁尖的突出长度,脛刀线开度 $L_1 = 115\text{ mm}$ 。为减小入土阻力,犁体幅宽由上往下逐渐减小,根据旋耕链轮箱宽度将犁体上部幅宽确定为 $B_2 = 150\text{ mm}$ 。由于防漏犁与深松铲工况相近,参考深松铲标准取犁尖幅宽为 $B_1 = 80\text{ mm}$,底部张角 $\gamma_1 = 65^\circ$,顶部张角 $\gamma_2 = 80^\circ$ ^[10]。为缩短入土行程,降低入土阻力,确定防漏犁入土角 $\sigma_1 = 35^\circ$,入土缝隙角 $\beta_1 = 8^\circ$ ^[11]。

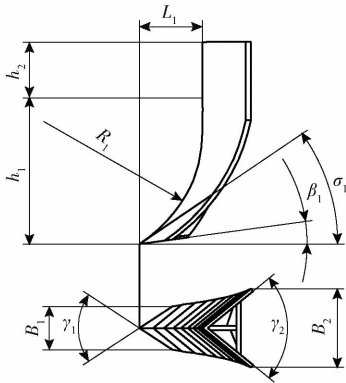


图 6 防漏犁结构图

Fig. 6 Structure diagram of leak-proof plough

2.2 旋耕部件设计

旋耕部件用于切削粉碎种植区域的土壤,降低开沟犁的前进阻力,增加土壤疏松程度与通透性,促进甘蔗根系发育^[12-13]。旋耕部件总体结构如图 7 所示,主要由旋耕刀、刀盘、刀轴、挡泥板和链轮箱组成。旋耕刀轴与链轮箱通过花键连接,单侧安装两片旋耕刀盘,将单侧旋耕区域划分为 4 个切削小区。为避免旋耕抛出土壤回流种沟,防止土壤击打人员与进入传动部件,设计挡泥板将旋耕抛起土壤导流至侧向。

土壤破碎程度与切土节距相关,土壤颗粒细碎有利于甘蔗出芽与扎根。由切土节距理论得到旋耕转速计算公式为

$$n = \frac{6\,000v_m}{zS_D} \quad (3)$$

式中 n ——旋耕刀轴转速, r/min
 S_D ——切土节距, cm
 z ——各切削小区内旋耕刀片数量

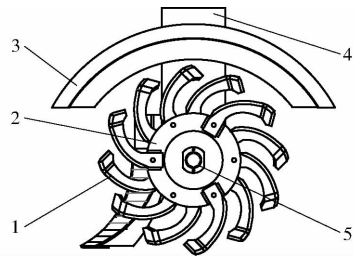


图 7 旋耕部件结构简图

Fig. 7 Structure diagram of rotary tillage unit

1. 旋耕刀 2. 刀盘 3. 挡泥板 4. 链轮箱 5. 刀轴

根据种植季节的土壤含水率和蔗地类型,选择 $S_D = 8\text{ cm}$ ^[14],由整机设计要求可知机具前进速度为 $0.6 \sim 1.2\text{ m/s}$,各切削小区内的刀片数量为 3,由式(3)计算得到旋耕转速为 $150 \sim 300\text{ r/min}$ 。

2.3 开沟犁设计

根据设计要求,开沟犁需要开出深度为 30 cm、宽度为 35 cm 以上的长方形种沟,并且开沟过程中土壤不能漫过犁面进入种沟。因此,设计开沟犁主要包括导曲线切削刃、犁曲面、护板、连接杆与支撑梁,结构与参数如图 8 所示。

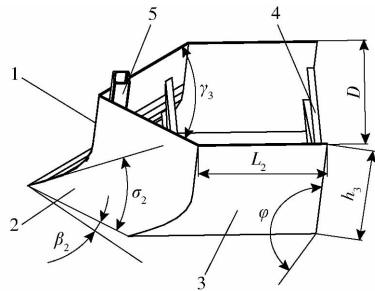


图 8 开沟犁结构简图

Fig. 8 Structure diagram of furrow plough

1. 切削刃 2. 犁曲面 3. 护板 4. 支撑梁 5. 连接杆

犁曲面和护板为主要触土面,用于将土壤进一步挤压粉碎,随后导流提升至两侧垄面,护板在对土壤挤压塑形的同时防止土垄上的土壤回流,从而形成一个稳定的落种空间。在中间加方形结构支撑梁增加犁体刚度,支撑两侧犁板与护板,避免受挤压变形影响沟型。

2.3.1 犁曲面参数分析

由图 8 所示的开沟犁设计参数可知,犁体参数由导曲线、犁体高度 h_3 、护板幅宽 D 、入土角 σ_2 、入土缝隙角 β_2 、护板倾角 φ 、开角 γ_3 和挡板长度 L_2 决定。对土迹线上的土壤颗粒在开沟犁曲面的运动进行分析,如图 9 所示。

由受力分析可知,土壤颗粒受力有竖直向下的重力 m_2g 、犁曲面的摩擦力 f 、挤压力 F_N 。由于摩擦力与压力为空间力,设前进方向为 x 轴正方向、竖直向下的重力方向为 y 轴正方向、侧边为 z 轴方向建立空间直角坐标系,将挤压力沿坐标轴 3 个方向分

式中 Z ——水平直线高度,mm

如图 10b 所示,设计元线角变化曲线分为两段,为了避免犁壁翼边线刮擦到已经翻出的土壤,应使 $\theta_{\min} \leq \theta_0$,因此设计第 1 段元线角是直线,从 θ_0 直线递减至 $\theta_{\min}$;第 2 段元线角为抛物线,从 $\theta_{\min}$ 增大至 $\theta_{\max}$ 。

取 θ_0 为 36° , $\theta_{\min}$ 为 35° , $\theta_{\max}$ 为 43° ^[22],则元线角变化方程为

$$\theta = \begin{cases} 36 - \frac{Z}{140} & (0 \leq Z \leq 140 \text{ mm}) \\ 35 + \frac{1.29[6.2(Z-140)^2]}{(Z-140)^2 + 100} & (140 \text{ mm} < Z \leq 540 \text{ mm}) \end{cases}$$

(16)

2.3.3 护板参数设计

结合横向种植的落种要求,护板既要阻挡土壤回填种植沟破坏有效落种空间,又需要在蔗种落下后回填土壤,减少土壤扰动。当护板倾角大于土壤内摩擦角时,土壤平衡状态被打破,进行运动学分析得

$$W = \frac{1}{2}(g \sin \varphi - \mu g \cos \varphi) t_2^2$$

(17)

式中 W ——斜面方向土壤下滑距离,m

μ ——触土部件滑动摩擦因数

t_2 ——土壤回填时间,s

由式(17)可知,土壤颗粒下滑距离与护板倾角、触土部件滑动摩擦因数相关,当土壤回填时间一定时,倾角越大,摩擦因数越小,回填的距离越长,土壤量越多。为了保证垄沟宽度并使得土壤在开沟完成后及时回填种沟,取 $\varphi = 90^\circ$ ^[23]。

有效落种空间对开沟犁的设计要求为 $S_2 \leq 6.4 \text{ cm}$ 。为避免由于振动影响斜抛距离导致蔗种落在有效落种空间之外的情况发生,设计的护板长度应延伸至落种点下方覆盖落种区域,即 $S_2 \leq 0$,得到 $L_2 = 500 \text{ mm}$ 。为避免土壤漫入,提前回填种沟导致有效落种深度变浅与方向改变,取 $D = 500 \text{ mm}$,护板高度与犁体高度相同,取为 540 mm 。

3 田间试验

3.1 试验条件

为检验所设计开沟犁的作业效果和作业功耗,探究作业参数对有效落种深度、旋耕功率和开沟阻力的影响,搭建田间试验平台,如图 11 所示,试验于 2020 年 11 月在广西亚热带农科新城甘蔗良种研发与繁育基地进行。

在试验平台上旋耕部件安装最低点比开沟犁低 50 mm ,用于在沟底形成浮土层,两者之间的水平距离为 670 mm 。试验设备包括试验平台、东方红



图 11 试验平台

Fig. 11 Experiment platform

LX1204 型拖拉机(功率 88.2 kW)、SG404H 型无线应变传感器节点(北京必创科技股份有限公司,测量范围: $\pm 15\,000 \mu\epsilon$,测量精度: $0.05\% \text{ red} \pm 5 \mu\epsilon$)、TQ201H 型无线扭矩传感器节点(北京必创科技股份有限公司,测量范围: $\pm 12\,000 \mu\epsilon$,测量精度: $0.1\% \text{ red} \pm 2 \mu\epsilon$)、迈测 X6 型激光测距仪(深圳市迈测科技有限公司,测量范围: $0.2 \sim 40 \text{ m}$,测量精度: $\pm 2.0 \text{ mm}$)、TYD-2 型数显土壤硬度计(浙江托普云农科技股份有限公司,测量范围: $0 \sim 1\,000 \text{ N/cm}^2$,测量精度: $\pm 0.5\%$)、TZS-2X-G 型土壤含水率测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司,测量范围: $0 \sim 100\%$,分辨率: 0.1%)、DT-2234B 型光电式转速计(台湾路昌电子企业股份有限公司,量程 $5 \sim 999.9 \text{ r/min}$,精度: $\pm 0.05\%$)等。

选取地势平坦的深松蔗地作为试验区域,在试验区域用五点法确定取样点位^[24],测得土壤条件如表 1 所示,土壤类型为砖红壤。

表 1 试验区域土壤条件

Tab. 1 Soil condition of experimental area

测量深度/cm	平均土壤含水	平均土壤硬度/
	率/%	($\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$)
0 ~ 10	5.2	33.5
10 ~ 20	9.8	81.1
20 ~ 30	16.6	261.0
30 ~ 40	16.8	> 600.0

3.2 试验方案

在田间作业时,横向种植机的作业参数主要包括工作深度、旋耕转速和机具前进速度^[25]。并且根据现有研究^[26-27]与前期预试验,这 3 项参数会对落种效果、作业功耗及阻力产生重要影响。因此,选择工作深度、旋耕转速和机具前进速度作为试验因素,选择旋耕功耗、开沟阻力和有效落种深度作为试验指标,开展三因素三水平正交试验,验证开沟器开沟性能,并探究作业参数对开沟指标的影响,获得较优的作业参数组合。为研究不同工作深度对实际开沟性能和落种效果的影响,根据甘蔗种植的常见深度

和同类型种植机研究的开沟深度范围^[5-6,8-9],选择工作深度范围为 10 ~ 30 cm。根据 2.2 节旋耕部件设计要求,选择旋耕转速范围为 200 ~ 300 r/min。由于拖拉机的作业速度由拖拉机前进挡位决定,因此根据拖拉机的技术参数与机具技术要求,选择低Ⅰ、低Ⅱ与低Ⅲ 3 个拖拉机的前进挡位,速度范围为 0.65 ~ 1.20 m/s。因素水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平

Tab.2 Experimental factors and levels

水平	试验因素		
	旋耕转速/	工作深度/	前进速度/
	(r·min ⁻¹)	cm	(m·s ⁻¹)
1	200	10	0.65
2	250	20	0.97
3	300	30	1.20

3.3 试验指标

3.3.1 有效落种深度

有效落种深度是衡量落种空间是否有效和落种是否合格的定性指标。开沟试验时,蔗种由人工在开沟犁护板尾部位置投掷。试验完成后,刨开覆土层使得蔗种露出地面,使用卷尺测量蔗种的初始落种深度,如图 12 所示。



图 12 初始落种深度测量

Fig. 12 Original seeding depth measurement

测量值减去垄高后取平均值作为该组试验的有效落种深度 H_s 。

3.3.2 开沟阻力

在开沟犁连接杆上粘贴应变片,由受力分析可知,开沟阻力主要为前进方向阻力,通过测力计与葫芦吊等设备对前进方向阻力标定,如图 13 所示,得到主应变片与前进阻力的标定方程为

$$F_R = 14.942\varepsilon - 39.259 \tag{18}$$

式中 F_R ——开沟犁的开沟阻力,kN

ε ——主应变片应变, $\mu\varepsilon$

利用标定方程计算各组试验的开沟阻力。

3.3.3 旋耕功耗

使用应变片和无线扭矩测量传感器节点测量旋耕扭矩,计算功率得到旋耕功耗。



图 13 开沟阻力标定

Fig. 13 Calibration for furrowing resistance

$$P_T = \frac{Tn}{9\,550} \tag{19}$$

式中 P_T ——旋耕功耗,kW

T ——旋耕扭矩,N·m

3.4 正交试验结果分析

3.4.1 极差分析

选用 $L_9(3^4)$ 正交表,进行三因素三水平正交试验,试验安排与试验结果如表 3 所示, A 、 B 、 D 为旋耕转速、工作深度、前进速度水平。极差分析结果表明,影响有效落种深度、旋耕功耗和开沟阻力的主

表 3 正交试验设计和结果

Tab.3 Design scheme and results of orthogonal experiment

序号	A	B	空列	D	H_s /cm	P_T /kW	F_R /kN
1	1	1	1	1	9.9	2.1	6.4
2	1	2	2	2	19.6	6.9	6.1
3	1	3	3	3	29.8	34.4	15.2
4	2	1	2	3	9.8	3.3	7.3
5	2	2	3	1	19.4	11.0	8.9
6	2	3	1	2	29.9	37.3	17.7
7	3	1	3	2	9.1	6.5	7.8
8	3	2	1	3	18.8	13.4	7.4
9	3	3	2	1	28.3	42.5	16.5
H_s	k_1	19.8	9.6	19.5	19.2		
	k_2	19.7	19.3	19.2	19.5		
	k_3	18.7	29.3	19.4	19.4		
	R	1.1	19.7	0.3	0.3		
	主次顺序	$B、A、D$					
P_T	最优组合	$A_1B_3D_2$					
	k_1	14.5	4.0	17.6	18.5		
	k_2	17.2	10.4	17.6	16.9		
	k_3	20.8	38.1	17.3	17.0		
	R	6.3	34.1	0.3	1.6		
F_R	主次顺序	$B、A、D$					
	最优组合	$A_1B_1D_2$					
	k_1	9.3	7.2	10.5	10.6		
	k_2	11.3	7.5	9.9	10.5		
	k_3	10.6	16.4	10.6	10.0		
	R	2.0	9.2	0.7	0.6		
	主次顺序	$B、A、D$					
	最优组合	$A_1B_1D_3$					

次因素均为 B 、 A 、 D ，说明工作深度对试验指标的影响最大，其次为旋耕转速，前进速度的影响最小。有效落种深度是评价开沟器性能的关键指标，最优的作业参数应为满足落种要求的条件下，旋耕功率和开沟阻力相对较小的参数。但是，在实际生产中还需要考虑作业效率以降低作业成本。由于前进速度为决定作业效率的因素且为次要影响因素，因此综合考虑较优作业参数组合取为 $A_1B_3D_3$ ^[28]。

3.4.2 方差分析

为了进一步分析各因素水平对各指标影响的显著性，对试验数据进行方差分析，分析结果如表 4 所示。由方差分析结果可知，对于各试验指标，因素的影响显著性主次顺序均为 B 、 A 、 D ，与极差分析相吻合。即旋耕转速对旋耕功率有极显著影响；工作深度对有效落种深度、旋耕功耗和开沟阻力影响极显著；前进速度对旋耕功耗有显著性影响。这说明旋耕转速改变影响单位时间内切削次数，导致旋耕功耗改变。工作深度直接决定有效落种深度，由于切削量和出土量增加，旋耕功率和开沟阻力随着工作深度增加。提高前进速度，导致切土节距增大和旋耕功耗增加。

表 4 正交试验方差分析

Tab.4 Variance analysis results of orthogonal experiment

试验指标	方差来源	离差平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
有效落种深度	<i>A</i>	2.00	2	1.00	14.29	0.065
	<i>B</i>	584.18	2	292.09	4 172.71	<0.001 **
	<i>D</i>	0.18	2	0.09	1.29	0.437
	误差	0.14	2	0.07		
	总和	586.50	8			
旋耕功耗	<i>A</i>	60.54	2	30.27	378.38	0.003 **
	<i>B</i>	1 968.23	2	984.11	12 132.92	<0.001 **
	<i>D</i>	4.94	2	2.47	30.88	0.032 *
	误差	0.16	2	0.08		
	总和	2 033.87	8			
开沟阻力	<i>A</i>	6.58	2	3.29	8.89	0.100
	<i>B</i>	167.58	2	83.79	226.46	0.004 **
	<i>D</i>	0.72	2	0.36	0.97	0.510
	误差	0.74	2	0.37		
	总和	175.62	8			

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

3.5 田间验证试验

根据极差分析得到较优作业参数组合 $A_1B_3D_3$ ，

即旋耕转速 200 r/min，工作深度 30 cm，前进速度为 1.20 m/s(低Ⅲ挡)。选择坡度与土壤条件相似的蔗地进行验证试验，试验结果如表 5 所示，平均有效落种深度为 29.9 cm，落种深度稳定性系数为 97.6%，覆土厚度为 8.8 cm，浮土厚度 3.4 cm，说明在此作业参数下，所设计的开沟器性能指标均满足横向种植机的有效落种要求，平均旋耕功耗为 34.0 kW，单侧开沟阻力为 14.1 kN。

表 5 验证试验结果

Tab.5 Results of verification experiment

参数	试验序号			平均值
	1	2	3	
有效落种深度/cm	29.4	31.0	29.4	29.9
稳定性系数/%	98.0	96.7	98.0	97.6
覆土厚度/cm	9.4	8.2	8.8	8.8
浮土厚度/cm	2.6	5.5	2.0	3.4
旋耕功耗/kW	32.8	34.5	34.6	34.0
单侧开沟阻力/kN	15.1	12.4	14.7	14.1

4 结论

(1)根据甘蔗横向种植的落种要求，对有效落种空间的形成机理进行分析，并基于有效落种空间提出开沟器的设计要求，设计了一种组合式开沟器。通过落种与土壤的运动学分析，确定了防漏犁、旋耕部件和开沟犁的结构参数。

(2)通过搭建试验平台进行田间试验，探究旋耕转速、工作深度和前进速度对开沟器性能的影响规律。试验的方差分析结果表明，工作深度对有效落种深度、旋耕功耗和开沟阻力有极显著影响；旋耕转速对旋耕功耗有极显著影响；前进速度对旋耕功耗有显著性影响。通过极差分析得到各因素对各试验指标影响的主次顺序均为工作深度、旋耕转速、前进速度，较优作业参数组合为旋耕转速 200 r/min、工作深度 30 cm 和前进速度为 1.20 m/s(低Ⅲ挡)。

(3)采用较优作业参数组合开展田间验证试验，试验结果表明，在该参数组合下开沟器作业形成的种植沟可以形成有效落种空间，落种不转向，落种深度稳定。有效落种深度为 29.9 cm，落种深度稳定性系数为 97.6%，覆土厚度 8.8 cm，浮土厚度 3.4 cm，旋耕功耗 34.0 kW，单侧开沟阻力为 14.1 kN，满足甘蔗横向种植有效落种空间形成的开沟要求。

参 考 文 献

[1] 韦敬楠. 机械化对广西农户甘蔗生产效率的影响[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9):216–222.
WEI Jingnan. Influence of mechanization on sugarcane production efficiency of farmers in Guangxi[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9):216–222. (in Chinese)

- [2] YADAV R D, SINGH D, BHATNAGAR A. Effect of sett size, seed rate and sett treatment on yield attributes and productivity of spring sugarcane in subtropical India[J]. *Madras Agricultural Journal*, 2013, 100(7/9):713–716.
- [3] 罗亚伟,覃振强,梁阔,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)
- [4] 杨洪岂,郭兆建,陈寿宏,等. 云蔗03–194不同下种量及下种方式试验表现[J]. *中国糖料*, 2015, 37(3):18–20. YANG Hongqi, GUO Zhaojian, CHEN Shouhong, et al. Influence of planting method and density on economic traits of sugarcane cultivar Yunzhe 03–194[J]. *Sugar Crops of China*, 2015, 37(3):18–20. (in Chinese)
- [5] SINGH A K, SINGH P R. Development of a tractor operated sugarcane cutter planter for mechanization of sugarcane planting in deep furrows[J]. *Sugar Tech.*, 2017, 19(4):416–423.
- [6] 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)
- [7] 夏利利,刘勇,王智. 一种实时切段式甘蔗种植机的设计[J]. *江苏农机化*, 2016(1):37–39.
- [8] 张国庆,李粤,邓怡国,等. 甘蔗健康种苗半自动种植机开沟器的设计[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(18):152–156. ZHANG Guoqing, LI Yue, DENG Yiguo, et al. Design of furrow opener of semi-automatic planter for healthy sugarcane seeds[J]. *Guangdong Academy of Agricultural*, 2015, 42(18):152–156. (in Chinese)
- [9] SINGH S, TRIPATHI A, SINGH A K. Effect of furrow opener design, furrow depth, operating speed on soil characteristics, draft and germination of sugarcane[J]. *Sugar Tech.*, 2017, 19(5):476–484.
- [10] JB/T 9788—2020 深松铲和深松铲柄[S]. 2020.
- [11] 李军宇,张淑娟,王曙光. 小麦宽幅播种机种肥开沟装置的设计与研究[J]. *农机化研究*, 2018, 40(6):116–119, 161. LI Junyu, ZHANG Shujuan, WANG Shuguang. Design and experiment for the fertilizer ditching device of wheat wide seeder[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(6):116–119, 161. (in Chinese)
- [12] ZHAO Peifang, GUO Jiawen, GAO Xinxin, et al. Small-scale mechanical harvesting and tractor-caused soil compaction reduce early growth in sugarcane[J]. *Agronomy*, 2019, 9(12):830–846.
- [13] 张华,罗俊,袁照年,等. 甘蔗机械化种植的农艺技术分析[J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(1):78–81. ZHANG Hua, LUO Jun, YUAN Zhaonian, et al. Agronomic techniques to sugarcane mechanical seeding[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(1):78–81. (in Chinese)
- [14] 李守仁,林金天. 驱动型土壤耕作机械的理论 with 计算[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [15] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11):79–87. LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11):79–87. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [17] 邢义胜,郭志军. 土壤耕作部件宏观触土曲面设计研究现状分析[J]. *农机化研究*, 2014, 36(1):1–4. XING Yisheng, GUO Zhijun. Actuality analysis of designing on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(1):1–4. (in Chinese)
- [18] 郭志军,杜干,周志立,等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6):47–52. GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6):47–52. (in Chinese)
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [20] 贾洪雷,孟凡豪,刘立晶,等. 芯铧式开沟器仿生设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4):44–49, 77. JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4):44–49, 77. (in Chinese)
- [21] 王军增,孙伟,王虎存,等. 尖角长翼型开沟器的研究[J]. *农机化研究*, 2021, 43(11):64–70. WANG Junzeng, SUN Wei, WANG Hucun, et al. Research of long wing and sharp angle opener[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(11):64–70. (in Chinese)
- [22] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [23] 张青松,廖宜涛,陶威,等. 油菜垄作精量联合直播机起垄装置设计与试验[J]. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(3):181–189. ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, TAO Wei, et al. Design and experiment for ridge lifting device of rapeseed planter[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(3):181–189. (in Chinese)
- [24] GB/T 5262—2008 农业机械试验条件 测定方法的一般规定[S]. 2008.
- [25] ZHONG J Q, TAO L M, LI S P, et al. Design and evaluation of a novel transversal double-bud sugarcane planter with seed pre-cutting[J]. *Sugar Tech.*, 2021, 23(5):1147–1156.
- [26] 赵淑红,顾志远,袁溢文,等. 马铃薯曲面式播种开沟器仿生设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12):32–42, 64. ZHAO Shuhong, GU Zhiyuan, YUAN Yiwen, et al. Bionic design and experiment of potato curved surface sowing furrow opener[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12):32–42, 64. (in Chinese)
- [27] 陈海涛,魏志鹏,苏文海,等. 前置式大垄原茬地种床整备装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10):51–60, 73. CHEN Haitao, WEI Zhipeng, SU Wenhai, et al. Design and experiment of cleaning and anti-blocking of front-mounted seed bed preparation device for grand ridge with raw stubble[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10):51–60, 73. (in Chinese)
- [28] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.