doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.12.006

立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机设计与试验

武　涛[1]　罗小伟[1]　蒋姣丽[2]　刘庆庭[1]　邹小平[1]　黄俊杰[1]
(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 广东省农业技术推广中心, 广州 530104)

摘要: 甘蔗中耕培土作业质量对促进甘蔗植株生长、抗倒伏、增产等有重要影响。传统等行距甘蔗中耕培土机对宽窄行甘蔗种植模式下的培土效果不佳,易造成窄行蔗垄“火山口”现象。针对上述问题,设计了一种立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机;根据宽窄行种植模式下培土农艺要求,通过理论计算确定了关键部件结构与作业参数范围;采用 EDEM 软件,以旋耕深度、螺旋输送器转速和作业速度为试验因素,以培土高度和作业功耗为试验指标进行离散元仿真试验,仿真结果表明:旋耕深度、螺旋输送器转速和作业速度对培土高度和作业功耗的影响显著;当作业速度为 4 km/h 时,旋耕深度与螺旋输送器转速交互作用对培土高度影响不显著,对作业功耗影响不显著,获得最优作业参数为:旋耕深度 274 mm、螺旋输送器转速 245 r/min。通过样机田间试验验证了仿真结果准确可靠,田间性能试验结果为:平均培土高度 134.4 mm,培土高度合格率 100%,甘蔗损失率 4%,除草率 90%,培土后窄行蔗丛基部形成龟背垄,无火山口形状,符合宽窄行种植模式下的培土作业要求。

关键词: 甘蔗; 宽窄行; 中耕培土机; 立式螺旋送土装置; 离散元法
中图分类号: S224.1+6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)12-0071-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Vertical Screw-feeding Cultivator-hiller for Sugarcane in Wide and Narrow Planting Mode

WU Tao[1]　LUO Xiaowei[1]　JIANG Jiaoli[2]　LIU Qingting[1]　ZOU Xiaoping[1]　HUANG Junjie[1]
(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *Guangdong Agricultural Technology Extension Center*, *Guangzhou* 530104, *China*)

Abstract: The quality of intertillage and ridging operations in sugarcane has a significant impact on promoting the growth of sugarcane plants, lodging resistance and increasing yield. Traditional sugarcane intertillage ridges with equal row spacing have poor ridging effects on sugarcane planted in the wide-narrow row pattern, which is prone to causing the “volcano mouth” phenomenon in the narrow-row sugarcane ridges. In response to the above problems, a vertical screw-feeding culticator-hiller for sugarcane in wide-narrow row was designed; according to the ridging agronomic requirements under the wide-narrow row planting pattern, the structure of key components and the range of operation parameters were determined through theoretical calculations; in the context of using EDEM software, the test factors included the rotary tillage depth, screw-feeding device rotation speed, and travel speed, with the ridging height and operation power consumption as the test indicators. The simulation results showed that the rotary tillage depth, screw-feeding machine rotation speed, and travel speed had significant effects on the ridging height and operation power consumption; when the travel speed was 4 km/h, the interaction between the rotary tillage depth and the screw-feeding device rotation speed did not significantly affect either the ridging height or the operation power consumption. The optimal operation parameters obtained were as follows: the rotary tillage depth was 274 mm and the screw-feeding device rotation speed was 245 r/min. Through field tests of the prototype, the accuracy and reliability of the simulation results were verified. The field performance test results were as follows: the average ridging height was 134.4 mm,

收稿日期: 2024-07-23　修回日期: 2024-09-28
基金项目: 国家糖料产业技术体系项目(CARS-170402)和广东农技服务轻骑兵重大农业技术乡村行推广项目(粤财农(2024)28 号)
作者简介: 武涛(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事甘蔗生产机械化技术研究,E-mail: wt55pub@scau.edu.cn
通信作者: 刘庆庭(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事甘蔗生产机械化技术研究,E-mail: qingting@scau.edu.cn

the qualified rate of ridging height was 100%, the sugarcane injury rate was 5%, the weeding rate was 90%, and the narrow rows of canes formed a turtleback ridge at the base after cultivation, without crater shape, which met the ridging operation requirements under the wide-narrow row planting pattern.

Key words: sugarcane; wide and narrow line; cultivator-hiller; vertical screw-feeding device; discrete element method

0 引言

中耕培土是甘蔗生产的重要环节,主要作用是促进甘蔗根部分蘖和生长、保墒、防止土壤板结、减少水分流失、防倒伏等[1]。传统甘蔗中耕培土机适用于等行距种植模式,不适用广西、广东部分地区采用的宽窄行种植模式[2]。在宽窄行种植模式下,传统等行距中耕培土机难以对窄行甘蔗内侧实行培土,导致甘蔗根部呈现两边高中间低的“火山口”现象,该现象会造成甘蔗生长中后期抗倒伏能力差,进而在机械化收获环节造成宿根拔蔸、破头和含杂率高等问题,严重影响甘蔗生产和增收。若能对窄行蔗垄进行足量培土,将大幅降低“火山口”现象的发生,对提高甘蔗产量以及促进甘蔗机械化收获具有重要意义。

国外甘蔗中耕培土机机型较大、效率高、造价贵、适用于大田作业,不适于我国广西和云南地区丘陵多、地块小、坡度大的地域特点。国产甘蔗中耕培土机按照开沟培土部件划分,主要有犁铧式、螺旋式和圆盘式[3]。张婷等[4]研制的 3ZSP-2 型甘蔗中耕培土机,采用前置旋耕刀碎土,后置犁铧式装置培土的形式进行培土作业。黄世醒等[5]设计了一种圆盘式甘蔗中耕施肥培土机,采用圆盘耙进行培土作业,其行距可调,碎土塑垄能力强。吕美巧等[6]研制了一种通过斜转刀盘装置偏置旋转开出 V 型沟槽以提高甘蔗抗倒伏性的甘蔗中耕培土机。广西柳工机械股份有限公司生产的柳工 M612 型甘蔗中耕培土机[7],前置深松铲进行松土,后置圆盘耙进行培土作业。综上,目前市场上缺乏适用于宽窄行种植农艺的中耕培土机,窄行培土不到位的问题尚待解决,亟需研制适用于甘蔗宽窄行种植模式的中耕培土机。

为满足甘蔗宽窄行中耕培土农艺要求,本文设计一种旋耕刀抛土与立式螺旋输送土壤结合的甘蔗宽窄行中耕培土机,通过理论计算确定中耕培土机的结构与主要作业参数范围。同时为进一步提高培土机性能,对培土过程进行离散元仿真,以探究各因素对培土高度和作业功耗的影响,并通过多因素优化试验获得最优解。最后通过田间试验对样机性能进行验证。

1 甘蔗宽窄行中耕培土农艺要求

以广东省遂溪县为例,甘蔗宽窄行种植模式如图 1 所示。甘蔗宽窄行种植模式培土农艺要求为[8]:培土应进入窄行的行间并填平行间地面,形成凸起的“龟背垄”,避免凹陷的“火山口”形状,培土高度大于 8 cm。

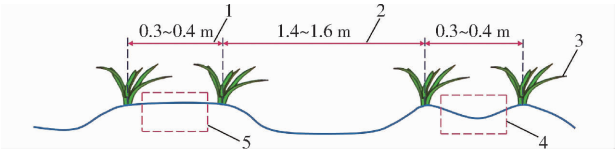


图 1 甘蔗宽窄行种植模式

Fig. 1 Sugarcane wide and narrow row planting mode

1. 窄行 2. 宽行 3. 蔗苗 4. 火山口 5. 龟背垄

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

整机主要由机架、悬挂装置、变速箱、分动箱、链传动装置、旋耕装置、螺旋输送装置和培土板等组成,其整体结构如图 2 所示。作业部件安装在机架上,机架前方焊接三点悬挂机构,中部布置变速箱,左右两侧布置分动箱;分动箱下方连接旋耕抛土装置,后方布置立式螺旋送土装置;立式螺旋送土装置通过链传动装置与分动箱连接,其两侧分别安装培土板。分动箱和立式螺旋送土装置在机架上的安装位置均可横向调节,从而实现中耕培土机作业宽幅的变化。其主要技术参数如表 1 所示。

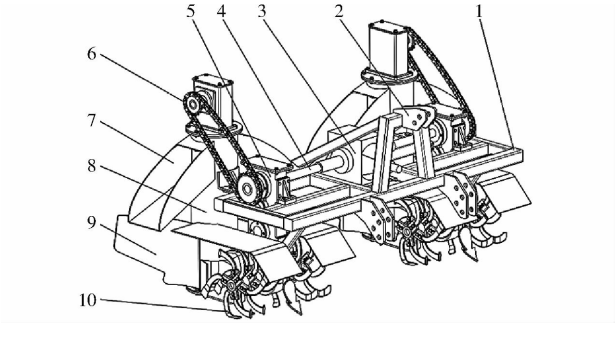


图 2 立式螺旋送土甘蔗宽窄行培土机整机结构图

Fig. 2 Structure drawing of vertical screw-feeding cultivator-hiller for sugarcane in wide and narrow planting

1. 机架 2. 悬挂装置 3. 变速箱 4. 传动轴 5. 分动箱 6. 链传动装置 7. 落土槽 8. 立式螺旋送土装置 9. 培土板 10. 旋耕装置

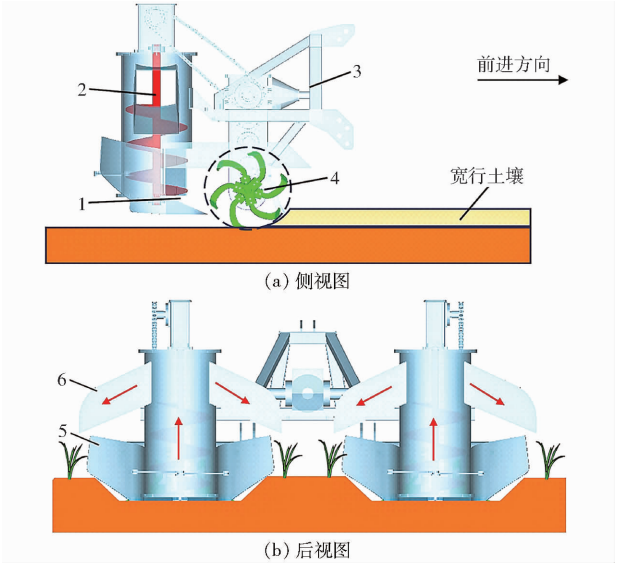
表 1　机具主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of machine

参数	数值
配套功率/kW	≥90
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 600×1 500×1 500
整机质量/kg	912
作业速度/(km·h^{-1})	2～4
作业行数	2
适应行距/mm	1 400～1 600(宽行) 300～400(窄行)
作业效率/(hm^2·h^{-1})	≥0.5
培土高度/mm	80～200

2.2　工作原理

甘蔗中耕培土机通过三点悬挂装置与拖拉机连接,并由拖拉机牵引前进。田间作业时,拖拉机输出的源动力经变速箱和分动箱传递至旋耕装置,带动旋耕刀转动打碎宽行土壤,并抛送至立式螺旋送土装置喂入口;源动力经变速箱传递至链传动装置,带动螺旋输送器转动,土壤在立式螺旋送土装置作用下向上输送并抛送至落土槽,最后滑落至窄行内侧,实现窄行甘蔗内侧的培土;安装于立式螺旋送土装置两侧的培土板在机具前进时同步将土壤推向窄行外侧,实现甘蔗窄行外侧的培土。工作原理如图 3 所示。



(a) 侧视图

(b) 后视图

图 3　培土作业原理图

Fig. 3　Schematics of soil cultivation

1. 喂入口　2. 螺旋输送器　3. 机架　4. 旋耕装置　5. 培土板　6. 落土槽

3　关键部件设计

3.1　旋耕装置设计

旋耕装置由旋耕刀、旋耕刀座、刀轴组成,如图 4 所示。旋耕刀通过螺栓安装在旋耕刀座上,旋耕刀座在同一旋转切削面内均匀布置 3 把旋耕刀,4 个旋耕刀座交错排列布置,组成旋耕刀组,刀轴左右两侧布置相同的旋耕刀组,刀轴连接传动箱。作业时,旋耕刀将宽行地垄中的土壤打碎,被打碎的土壤随着旋耕刀继续运动抛送到后方输送装置喂入口。

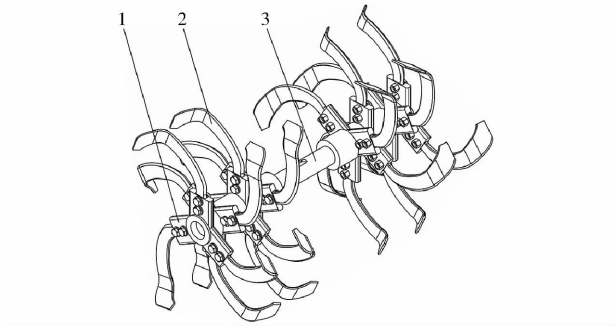


图 4　旋耕装置结构图

Fig. 4　Structure drawing of rotary tillage device

1. 旋耕刀座　2. 旋耕刀　3. 刀轴

3.1.1　土壤输送量理论值计算

根据宽窄行甘蔗种植情况,完成培土作业时,需要将宽行土壤培到窄行中,宽窄行甘蔗培土量如图 5 所示。宽行长度 L_1 为 1400 mm,窄行长度 L_2 为 400 mm,培土高度取 80～200 mm。

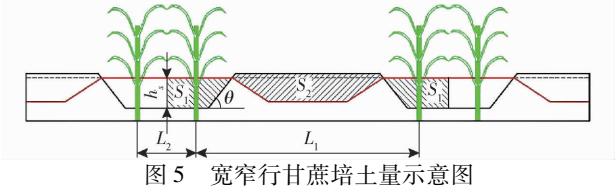


图 5　宽窄行甘蔗培土量示意图

Fig. 5　Schematic of soil cultivation capacity of sugarcane in wide and narrow planting mode

土壤输送量理论值[9]为

$$Q_1 = 2S_2 v_m \rho \tag{1}$$

其中

$$S_2 = \frac{2S_1}{\lambda_s}$$

式中　S_1——窄行所需培土面积,m^2

S_2——宽行取土面积,m^2

λ_s——土壤膨胀系数

Q_1——土壤输送量理论值,kg/s

v_m——中耕培土机作业速度,m/s

ρ——土壤密度,kg/m^3

根据培土标准选取培土高度为 80 mm,θ 为 60°,土壤膨胀系数 λ_s 取 2.09[9],v_m 取 2～4 km/h,根据试验地块测得 ρ 为 1 260 kg/m^3。计算得到土壤输送量理论值 Q_1 为 48.2～96.5 kg/s。

3.1.2　旋耕刀选型

旋耕刀作为旋耕装置关键部件,其参数型号直接关系旋耕作业效果。通过市场上多类刀片型号对

比,结合甘蔗宽窄行种植模式培土农艺要求的培土量,本文选取刀座式 IT245 旋耕刀,同时为提高旋耕深度以抛送更多土壤,在原有刀柄孔基础上向上 25 mm 新开一个刀柄孔,如图 6 所示,查阅相关标准可知其具体参数如表 2 所示。

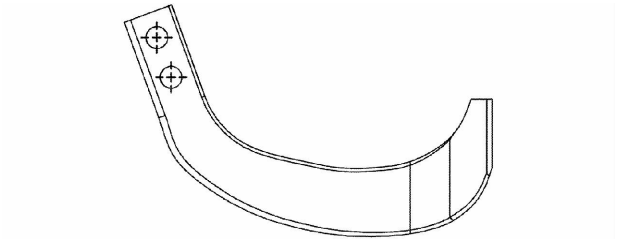


图 6 IT245 旋耕刀结构示意图

Fig. 6 Schematic of IT245 rotary cutter structure

表 2 IT245 旋耕刀参数

Tab. 2 Parameters of IT245 rotary cutter

参数	数值
弯刀回转半径/mm	245
刀柄宽度/mm	300
刀柄厚度/mm	10
幅宽/mm	50
正切面弯折角/(°)	120
刃口厚度/mm	0.1 ~ 0.2
刃部宽度/mm	12

3.1.3 切土节距

安装在同一回转平面内的旋耕刀切削土壤时入土点的距离为旋耕机切土节距。其对机具碎土性能有较大影响,一般情况下,切土节距越大,旋耕刀切下的土块越大,碎土程度低。切土节距可以表示为[10]

$$S=\frac{6\,000v_m}{Zn_1}=\frac{\pi R}{5Z\lambda} \tag{2}$$

式中 S——切土节距,cm

R——旋耕刀旋转半径,mm

λ——旋耕速比

n_1——旋耕装置转速,r/min

Z——在同一切削平面内旋耕刀数量

从式(2)中可知,降低机具作业速度,提高转速可以减小切土节距,从而提高碎土质量。然而降低作业速度会降低作业效率,提高转速会增加作业功耗。本设计中,常用的旋耕速比取值为 4 ~ 10[11],通过计算本设计选用 λ 为 7.5,旋耕装置同一旋转切削面内均匀安装的旋耕刀数量 Z 为 3,选取切土节距 S 为 6 ~ 9 cm[12]。

3.1.4 旋耕转速

结合同一切削面内安装的旋耕刀数量 Z、切土节距 S 和机具作业速度 v_m,根据式(2)可计算出旋耕装置转速 n_1 为 185 ~ 462 r/min。参照文献[13],将旋耕装置转速 n_1 设定为 240 ~ 320 r/min。

3.1.5 旋耕深度

结合选择的旋耕刀旋转半径和培土农艺要求[14],作业时控制旋耕深度 h 在 250 ~ 350 mm 范围内。

3.2 立式螺旋送土装置

为将宽行土壤向上输送并分送至窄行,设计了立式螺旋送土装置。立式螺旋送土装置由圆柱筒、螺旋输送器、落土槽和培土板等组成,如图 7 所示。

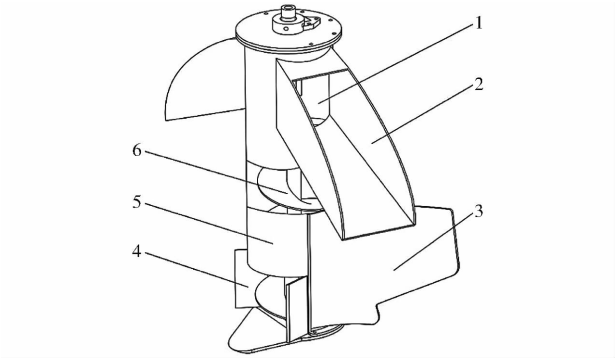


图 7 立式螺旋送土装置结构图

Fig. 7 Structure drawing of vertical screw-feeding

1. 出土口 2. 落土槽 3. 培土板 4. 喂入口 5. 圆柱筒 6. 螺旋输送器

3.2.1 螺旋输送器直径与圆柱筒直径

螺旋输送器土壤输送量 Q_2[15] 为

$$Q_2=60\frac{\pi}{4}\varphi\rho D^2S_Ln_2 \tag{3}$$

式中 φ——土壤填充系数

D——螺旋输送器叶片直径,mm

S_L——螺旋输送器螺距,mm

n_2——螺旋输送器转速,r/min

从式(3)可以看出,螺旋输送器输送量由螺旋输送器叶片直径 D、螺旋输送器螺距 S_L、螺旋输送器转速 n_2 和土壤填充系数 φ 决定。根据不同物料的综合特性,螺旋输送器直径选取应满足[9]

$$D>K\sqrt[2.5]{\frac{Q_2}{\rho^2\varphi}} \tag{4}$$

式中 K——物料综合特性系数

选取物料综合特性系数 K 为 0.041 5[16]。令螺旋输送器土壤输送量 Q_2 与理论土壤输送量 Q_1 相等,选取土壤填充系数 φ 为 0.5[17],可得螺旋输送器直径 $D\geqslant 358$ mm,设计选取螺旋输送器叶片直径 D 为 400 mm。根据螺旋输送器直径选取圆柱筒直径为 420 mm。

3.2.2 螺旋输送器螺距

螺旋输送器螺距 S_L 计算式为

$$S_L=K_1D \tag{5}$$

式中 K_1——倾斜输送系数

当螺旋倾斜布置或输送物料流动性差时 $K_1 \leqslant 0.8$[16]，选取 $K_1 = 0.7$，则螺旋输送器螺距 S_L 为 280 mm。

3.2.3　螺旋输送器转速

螺旋输送器外径螺旋角 α_D 和近轴处螺旋角 α_d 公式为

$$\begin{cases} \alpha_D = \arctan \dfrac{S_L}{\pi D} \\ \alpha_d = \arctan \dfrac{S_L}{\pi d} \end{cases} \tag{6}$$

临界转速是螺旋输送器转速的最小值，当低于此转速时无法向上输送物料[18]。螺旋输送器临界转速 n_K 为[19]

$$n_K = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2g}{D}}\frac{\tan(\alpha_D + \varphi_s)}{\mu_s} \tag{7}$$

其中　　$\varphi_s = \arctan\mu_s$

式中　g——重力加速度，m/s^2

μ_s——滑动摩擦因数

φ_s——滑动摩擦角，(°)

滑动摩擦因数 μ_s 选取 0.3[20]，计算得出滑动摩擦角 φ_s 为 16.7°，临界转速 n_K 为 90 r/min。由于垂直螺旋输送效率低于 45%[15]，为满足土壤输送量要求，需设定螺旋输送器转速 $n_2 \geqslant 200$ r/min。为方便控制螺旋输送器转速，本设计将螺旋输送器转速与旋耕装置转速保持一致，即螺旋输送器转速 n_2 设定为 240 ~ 320 r/min。

4　土壤运动仿真

离散元法(DEM)是解决散粒体相关问题的主要研究方法，在农机-土壤互作关系研究中得到广泛应用[21]。本研究采用 EDEM 离散元软件对宽窄行培土机的田间作业情况进行模拟和分析。

4.1　离散元仿真模型构建

4.1.1　三维仿真模型

根据实际测量尺寸，在 Solidworks 2016 软件中构建甘蔗宽窄行中耕培土机模型(材料为 65Mn 钢)和宽窄行土槽的三维模型，将其保存成 .stl 格式导入到 EDEM 2021 软件中。其中宽窄行土槽模型尺寸为：总长 10 m，总宽 3.6 m，包含 2 个宽行和 1 个窄行，其中宽行宽 1.4 m，高 0.35 m；窄行宽 0.4 m，高 0.05 m。为提高仿真效率，适当放大颗粒半径，减少仿真时间，对仿真结果影响不大[22]。本研究设置土壤颗粒为半径 5 mm 的实心圆球颗粒，颗粒生成总数为 1.5×10^6。构建完成的离散元三维仿真模型如图 8 所示。

4.1.2　土壤接触模型

广西等华南糖料甘蔗种植区土壤主要类型为砖红壤、赤红壤和红壤，存在粘结现象[23]，因此采用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 接触模型，用 JKR 表面能模拟土壤颗粒与触土部件间的粘结力，土壤与 65Mn 钢间 JKR 表面能取 4.5 J/m^2[24]。



图 8　仿真模型

Fig. 8　Simulation model

4.1.3　仿真参数设定

众多学者利用 EDEM 软件对土壤与触土部件进行了大量仿真研究，结合文献[25 - 27]与标定试验，设定仿真所需材料参数与接触参数，如表 3 所示。Simulator 模块时间步设为 20%，数据记录间隔为 0.1 s，总仿真时间为 13 s。

表 3　仿真参数设定

Tab. 3　Simulation parameter setting

材料	参数	数值
65Mn 钢	泊松比	0.35
	剪切模量/MPa	7.27×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	7 830
土壤	泊松比	0.30
	剪切模量/MPa	1×10^6
	密度/(kg·m^{-3})	1 620
土壤-土壤	恢复系数	0.6
	动摩擦因数	0.4
	静摩擦因数	0.6
土壤-65Mn 钢	恢复系数	0.6
	动摩擦因数	0.05
	静摩擦因数	0.5

4.2　单因素试验

4.2.1　试验方法与指标

为探明各作业参数对培土机性能指标的影响规律，根据理论分析和甘蔗宽窄行培土农艺作业要求，参考文献[8]，选取旋耕深度、螺旋输送器转速和作业速度为试验因素，培土高度和作业功耗为评价指标。

培土高度测量方法：在仿真平稳段截取 10 个横截面，采用 EDEM 中的测量工具，测量横截面中的培土高度，结果取平均值，如图 9 所示。

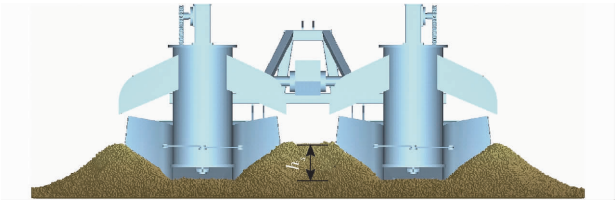


图 9　培土高度示意图

Fig. 9　Schematic of ridging height

作业功耗测量方法:在 EDEM 仿真软件后处理模块获得总扭矩,计算得到作业功耗为

$$P=\frac{60Tn_2}{9\,550} \tag{8}$$

式中 P——作业功耗,kW T——扭矩,N·m

4.2.2 试验结果与分析

(1)旋耕深度

保持中耕培土机作业速度为 3 km/h,螺旋输送器转速为 280 r/min,旋耕深度为 250 ~ 350 mm。旋耕深度对垄形的影响规律如图 10a 所示,随旋耕深度的增加,窄行垄形从“火山口”向“龟背垄”转变明显。旋耕深度对培土高度、作业功耗的影响如图 11a 所示,随着旋耕深度的增加,培土高度和作业功耗呈明显上升趋势,其中培土高度从 82.3 mm 上升至 335.6 mm,增幅为 307%;作业功耗从 51 kW 上升至 98.2 kW,增幅为 90%。

(2)螺旋输送器转速

保持中耕培土机作业速度为 3 km/h、旋耕深度为 300 mm,螺旋输送器转速为 240 ~ 320 r/min。螺旋输送器转速对垄形的影响规律如图 10b 所示,随螺旋输送器转速增大,窄行垄形变化不明显。螺旋输送器转速对培土高度、作业功耗的影响如图 11b 所示,随着螺旋输送器转速增加,培土高度和作业功耗呈缓慢上升趋势,其中培土高度从 178.8 mm 上升至 200.6 mm,增幅为 12.1%;作业功耗从 64.4 kW 上升至 93.1 kW,增幅为 44.5%。

(3)作业速度

保持中耕培土机旋耕深度为 300 mm,螺旋输送器转速为 280 r/min,作业速度为 2 ~ 4 km/h。作业速度对垄形的影响规律如图 10c 所示,随作业速度增加,窄行垄形变化不明显。作业速度对培土高度、作业功耗的影响如图 11c 所示,随着作业速度的增加,培土高度呈现先降低后增加的变化规律,作业功耗呈现缓慢增加的趋势,其中培土高度先从 209.9 mm 降至 183.7 mm 后又升至 205 mm,增幅为 2.3%;作业功耗从 60.3 kW 上升至 81.5 kW,增幅为 35%。

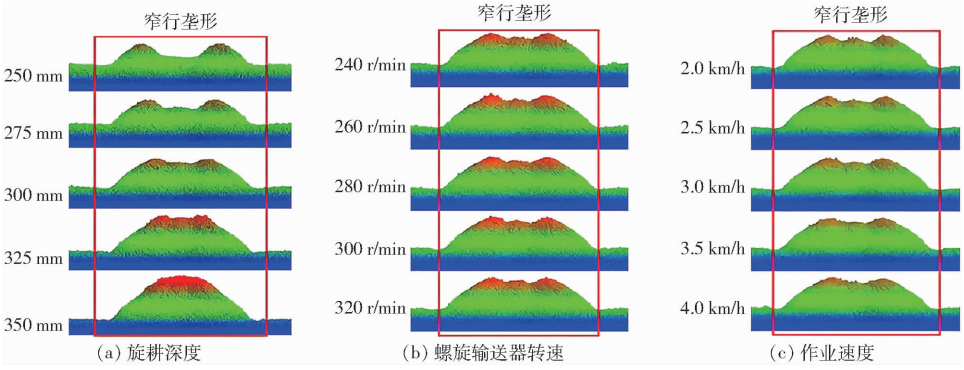


图 10 不同试验因素对垄形的影响

Fig. 10 Effects of different experimental factors on shape of ridges

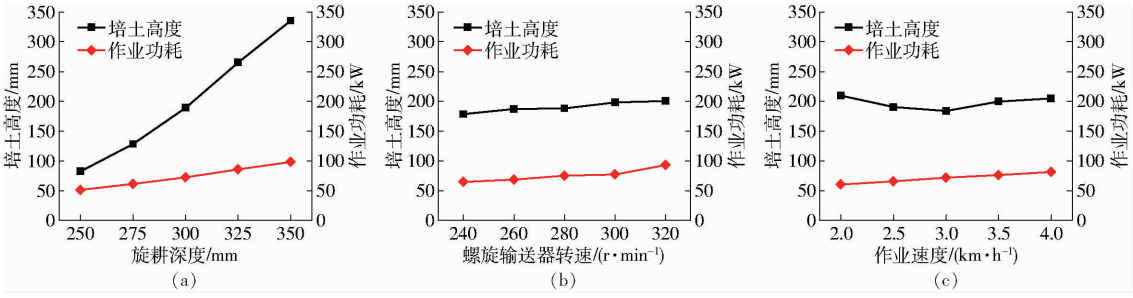


图 11 不同试验因素对培土高度、作业功耗的影响

Fig. 11 Effects of different experimental factors on ridging height and operation power consumption

4.3 作业参数正交试验优化

4.3.1 优化试验方案

由单因素试验结果可知:旋耕深度、螺旋输送器转速和作业速度对培土高度和作业功耗的影响显著。为兼顾作业效率与培土质量,将作业速度设定为 4 km/h,探究旋耕深度和螺旋输送器转速对培土机性能的详细影响规律及最佳参数组合。采用二次旋转正交组合试验方法,以旋耕深度和螺旋输送器转速作为试验因素,培土高度和作业功耗为性能评价指标,试验因素编码见表 4。试验方案与结果如表 5 所示,X_1、X_2 为因素编码值。

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Experimental factors codes

编码	因素	
	旋耕深度/mm	螺旋输送器转速/(r·min^{-1})
-1.414	204.64	251.72
-1	275	260
0	300	280
1	325	300
1.414	335.36	308.28

4.3.2　试验结果方差分析

采用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合分析，得到培土高度 Y_1 和作业功耗 Y_2 方差分析如表 6，二次回归模型均极显著（$P < 0.000\ 1$），失拟项不显著，R^2 均大于 0.99，表明回归模型与试验值符合程度高，回归方程不失拟。去掉不显著因素后建立培土高度 Y_1、作业功耗 Y_2 关于旋耕深度 X_1 和螺旋输送器转速 X_2 的二次回归方程

$$Y_1 = 189.14 + 70.45X_1 + 1.81X_2 - 3.6X_1X_2 + 3.66X_1^2 + 1.17X_2^2 \quad (9)$$

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Test scheme and results

编号	因素		培土高度	作业功耗
	X_1	X_2	Y_1/mm	Y_2/kW
1	1	1	259.60	104.70
2	-1	1	131.66	79.27
3	1	-1	259.35	93.45
4	-1	-1	117.00	70.64
5	-1.414	0	94.81	72.83
6	1.414	0	302.23	108.09
7	0	-1.414	193.70	78.35
8	0	1.414	193.39	96.65
9	0	0	188.08	85.75
10	0	0	189.82	85.74
11	0	0	185.30	84.52
12	0	0	193.87	86.81
13	0	0	188.64	85.74

表 6　回归模型方差分析

Tab. 6　Regression model variance analysis

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
培土高度	模型	39 883.80	5	7 976.76	330.58	<0.000 1 **
	X_1	39 709.31	1	39 709.31	1 345.68	<0.000 1 **
	X_2	26.18	1	26.18	1.08	0.332 2
	X_1X_2	51.91	1	51.91	2.15	0.185 9
	X_1^2	93.01	1	93.01	3.85	0.090 4
	X_2^2	9.51	1	9.51	0.39	0.550 1
	残差	168.91	7	24.13		
	失拟项	129.95	3	43.32	4.45	0.091 7
	误差	38.95	4	9.74		
	总和	40 052.70	12			
作业功耗	模型	1 491.38	5	298.28	137.52	<0.000 1 **
	X_1	1 203.08	1	1 203.08	554.70	<0.000 1 **
	X_2	261.25	1	261.75	120.68	<0.000 1 **
	X_1X_2	1.72	1	1.72	0.79	0.403 3
	X_1^2	24.66	1	24.66	11.37	0.011 9 *
	X_2^2	1.13	1	1.13	0.52	0.494 1
	残差	15.18	7	2.17		
	失拟项	12.55	3	4.18	6.37	0.052 9
	误差	2.63	4	0.66		
	总和	1 506.56	12			

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

$$Y_2 = 85.71 + 12.26X_1 + 5.72X_2 + 0.66X_1X_2 + 1.88X_1^2 + 0.40X_2^2 \quad (10)$$

4.3.3　参数优化

为得到较优的试验因素水平组合，利用 Design-Expert 软件中的优化模块对两个回归模型进行求解，根据农艺要求、作业性能要求及上述相关模型分析结果设定优化约束目标和条件为

$$\begin{cases} \min Y_2(X_1, X_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} Y_1(X_1, X_2) \geqslant 80\ \text{mm} \\ -1.414 \leqslant X_1 \leqslant 1.414 \\ -1.414 \leqslant X_2 \leqslant 1.414 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

通过对目标函数两个参数进行优化求解，能够得到多种参数组合，当作业速度为 4 km/h 时，其中最优参数组合为：旋耕深度 274 mm、螺旋输送器转

速 245 r/min,预测培土高度为 113 mm,作业功耗为 67.3 kW。对这组数据进行仿真验证,仿真结果为:培土高度 116.5 mm,作业功耗 68.4 kW。

5 田间试验

为进一步验证立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机的培土作业性能和仿真结果的准确性,根据总体结构设计方案,制造出立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机,进行样机田间试验。

5.1 样机验证试验

5.1.1 试验条件

试验于 2022 年 3 月在广西双高农机有限公司试验示范基地进行,样机验证试验现场如图 12 所示。试验地地块面积 1 500 m^2,窄行平均宽度 456 mm,宽行平均宽度 1 472 mm,土壤类型为砖红壤,土壤坚实度为 695 kPa,土壤绝对含水率为 12.1%,配套动力为 132.5 kW 五征 1804 型拖拉机。



图 12 样机验证试验

Fig. 12 Prototype verification test

5.1.2 试验方法

样机验证试验以培土高度、作业功耗为试验指标,综合评价样机工作性能。

试验区由稳定区、测定区和停车区组成,测定区为 20 m。培土高度测量方法[8]:作业后,在培土后的窄行内每隔 1 m 选取一个测量点,用直尺测量培土高度,共测量 20 个点,如图 13 所示。功率采集方法:在培土机传动轴上安装扭矩传感器,通过扭矩作业功率仪采集扭矩(图 14),利用公式(8)计算总作业功耗。



图 13 试验场景

Fig. 13 Test scene



图 14 作业功率采集设备

Fig. 14 Operational power harvesting equipment

1. 扭矩作业功率仪 2. 扭矩传感器

5.1.3 仿真模型验证试验

为验证仿真模型准确性,设置单因素验证试验。根据上述仿真结果可知,旋耕深度为显著性影响因素,选取旋耕深度做单因素试验。设定作业速度 3 km/h、螺旋输送器转速 280 r/min,旋耕深度为 250、300、350 mm 共 3 个水平进行培土试验,选取培土高度和作业功耗为试验指标。田间试验结果与仿真结果对比如图 15 所示。

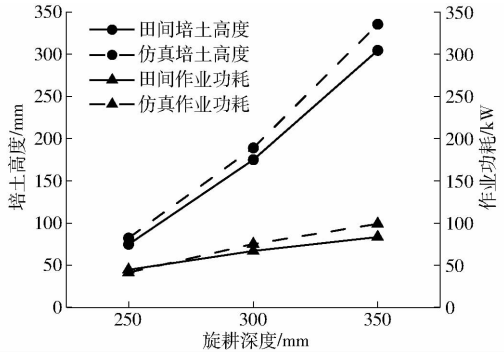


图 15 仿真试验与田间试验结果对比

Fig. 15 Comparison of simulation and field trial results

图 15 表明仿真试验与田间试验的培土高度、作业功耗曲线变化趋势基本一致,仿真结果与试验值最大偏差为 11.3%,最小偏差为 7.1%,与试验测试结果较为相符,说明离散元仿真模型准确有效,培土高度与作业功耗预测具有可靠性。

5.2 整机田间性能试验

5.2.1 田间试验条件

田间试验于 2024 年 9 月 13 日在广东省遂溪县北坡镇下黎村甘蔗种植基地进行,配套动力为雷沃欧豹 M1404 型拖拉机,功率为 102.9 kW。试验测得土壤绝对含水率为 10.5%,土壤坚实度为 1 500 kPa,宽窄行种植的宽行距与窄行距之和为 155 cm,跨行作业时甘蔗自然高度为 75 cm,试验地块连片集中,坡度平整。设计的立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机田间试验场景如图 16 所示。

5.2.2 田间试验方法

根据 DB 45/T 560—2021《甘蔗中耕施肥培土机作业质量》要求,以培土高度合格率、甘蔗损伤



图 16　田间试验场景

Fig. 16　Field test scene

率、除草率作为评价指标，综合评价样机作业性能。

5.2.3　田间性能试验

将最优作业参数：作业速度为 4 km/h、旋耕深度为 274 mm、螺旋输送器转速为 245 r/min，调整为作业速度为 4 km/h、旋耕深度为 300 mm、螺旋输送器转速 240 r/min，进行整机田间性能试验，为消除随机误差，进行 3 次重复试验取平均值，田间试验结果如表 7 所示，培土前后对比如图 17 所示。

表 7　田间试验结果

Tab. 7　Field test results

试验编号	培土高度/mm	培土高度合格率/%	甘蔗损伤率/%	除草率/%
1	133.4	100	4.6	88
2	120.4	100	3.5	93
3	149.6	100	3.9	89
平均值	134.4	100	4.0	90
标准值[8]	≥80	≥80	≤5	≥85

试验过程中机具工作平稳，各运动部件配合良好，旋耕装置碎土和抛土效果良好，平均培土高度为 134.4 mm，培土高度合格率为 100%，甘蔗损伤率为 4%，除草率为 90%，培土后窄行蔗丛基部形成龟背垄，无火山口形状。各试验指标优于 DB 45/T 560—2021《甘蔗中耕施肥培土机作业质量》标准，满足甘蔗宽窄行培土机性能要求。



(a) 培土前　　(b) 培土后

图 17　培土前后对比

Fig. 17　Photos before and after soil cultivation

6　结论

(1) 根据甘蔗宽窄行种植模式下的培土农艺要求，设计了一种立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机，实现了窄行甘蔗内侧培土。

(2) 利用 EDEM 软件对立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机进行离散元仿真试验，以旋耕深度、螺旋输送器转速和作业速度为试验因素，以培土高度和作业功耗为指标，建立了各试验因素与指标间的回归模型，回归模型高度拟合且显著，方差分析结果表明：旋耕深度、螺旋输送器转速和作业速度对培土高度和作业功耗的影响显著；旋耕深度和螺旋输送器转速的交互作用对培土高度影响显著，对作业功耗影响不显著。当作业速度为 4 km/h 时，优化后获得最佳参数为：旋耕深度 274 mm，螺旋输送器转速 245 r/min，中耕培土机培土作业效果较佳。

(3) 对立式螺旋送土甘蔗宽窄行中耕培土机样机进行了样机验证试验和田间性能试验，田间试验结果为：当作业速度为 4 km/h、旋耕深度为 300 mm、螺旋输送器转速为 240 r/min 时，平均培土高度为 134.4 mm，培土高度合格率为 100%，甘蔗损失率为 4%，除草率为 90%，培土后窄行蔗丛基部形成龟背垄，无火山口形状，各试验指标均优于标准要求，满足甘蔗宽窄行培土机作业性能要求。

参　考　文　献

[1] 农宏亮，曾伯胜，范雨杭. 甘蔗中耕施肥培土技术及发展趋势分析[J]. 广西农业机械化，2017(3)：10－13.

[2] 区颖刚，刘庆庭，杨丹彤，等. 甘蔗生产机械化研究[M]. 镇江：江苏大学出版社，2018.

[3] 邓干然，李明. 我国甘蔗中耕培土机具的现状与分析[J]. 中国农机化，1999(1)：40－41.

[4] 张婷，李明，汪春，等. 多功能甘蔗中耕施肥培土机传动装置的设计[J]. 广东农业科学，2015，42(20)：140－144.
ZHANG Ting，LI Ming，WANG Chun，et al. Design on transmission system of a multi-functional sugarcane cultivator-cum-fertilizer-applicator[J]. Guangdong Agricultural Science，2015，42(20)：140－144. (in Chinese)

[5] 黄世醒，黄燕娟，周已圣，等. 圆盘式甘蔗中耕施肥培土机设计[J]. 现代农业装备，2017(6)：51－54.

[6] 吕美巧，刘丽敏，吴玉. V 型深沟甘蔗中耕施肥起垄培土机的研究设计[J]. 浙江大学学报，2019，45(2)：251－255.
LÜ Meiqiao，LIU Limin，WU Yu. Research and design of V-shaped deep trench sugarcane cultivating machine[J]. Journal of Zhejiang University，2019，45(2)：251－255. (in Chinese)

[7] 叶小玲，杨金霖. 广西甘蔗中耕施肥机械现状与发展方向[J]. 现代农机，2021(4)：7－8.

[8] DB 45/T 560—2021　甘蔗中耕施肥培土机作业质量[S]. 2021.

[9] 高凤. 双螺旋变螺距旋耕起垄机的研究与设计[D]. 南昌：江西农业大学，2013.
GAO Feng. Research and design of the double helix pitch rotary tilling ridger[D]. Nanchang：Jiangxi Agricultural University，

2013. (in Chinese)
[10] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[11] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2018.
[12] 周宏明,薛伟,桑正中. 旋耕机总体参数的优化设计模型[J]. 农业机械学报,2001,32(5):37 - 39.
ZHOU Hongming, XUE Wei, SANG Zhengzhong. Optimized design model for general parameters of a rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2001,32(5):37 - 39. (in Chinese)
[13] GB/T 5668—2017 旋耕机[S]. 2018.
[14] NY/T 2991—2016 农机农艺结合生产技术规程甘蔗[S]. 2016.
[15] 王鹰. 连续输送机械设计手册[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
[16] 黄石茂. 螺旋输送机输送机理及其主要参数的确定[J]. 广东造纸,1998(3):29 - 33.
[17] 徐余伟. 橡胶工业螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 橡塑技术与装备,2008(10):52 - 58.
XU Yuwei. The choice and decision of design parameters for screw conveyor for rubber industry[J]. China Rubber Plastics Technology and Equipment,2008(10):52 - 58. (in Chinese)
[18] 张氢,夏华,孙远韬,等. 垂直螺旋输送机临界转速的仿真研究[J]. 中国粉体技术,2017,23(5):1 - 6.
ZHANG Qing, XIA Hua, SUN Yuantao, et al. Simulation research of critical speed for vertical screw conveyor[J]. China Powder Science and Technology,2017,23(5):1 - 6. (in Chinese)
[19] 姚维祯. 垂直搅龙的临界转速和最佳参数[J]. 饲料机械,1984(4):4 - 10.
YAO Weizhen. Critical speed and optimal parameters of vertical auger[J]. Feed Machinery,1984(4):4 - 10. (in Chinese)
[20] 向伟,吴明亮,吕江南,等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(12):116 - 123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(12):116 - 123. (in Chinese)
[21] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1 - 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4): 1 - 20. (in Chinese)
[22] 熊平原,杨洲,孙志全,等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):113 - 121.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE,2018, 34(18):113 - 121. (in Chinese)
[23] 张彪,杨鑫三,王京云,等. 基于甘蔗耕地黏土离散元参数标定的流变模型构建[J]. 农业工程学报,2024,40(13):36 - 44.
ZHANG Biao, YANG Xinsan, WANG Jingyun, et al. Construction of a rheological model based on discrete element parameters calibration of clay from sugarcane cultivated land[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(13):36 - 44. (in Chinese)
[24] 武涛,黄伟凤,陈学深,等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报,2017,38(3):93 - 98.
WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017,38(3):93 - 98. (in Chinese)
[25] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):80 - 88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):80 - 88. (in Chinese)
[26] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报,2016,47(1):60 - 67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of atraw movement in straw - soil - rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1): 60 - 67. (in Chinese)
[27] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering,2017,160:140 - 153.