

大葱联合收获机设计与试验

王方艳^{1,2} 刘尊超¹ 张德康¹ 邱祝川¹ 江润田¹

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 山东省设施园艺智慧农业装备重点实验室, 青岛 266109)

摘要: 为解决大葱收获阶段挖掘易拥堵、损伤大等问题,本文确定集挖掘、抖土、夹持和输送工序为一体的收获方案及工作原理,设计一种适应垄作种植模式的大葱联合收获机。机具采用旋耕刀与挖掘铲组合的挖掘机构,通过旋耕刀切割和抛送,去除葱垄大部分多余土壤,可有效降低挖掘铲作业时挖掘阻力;采用偏心式抖土机构,可有效解决壅土问题;采用扭转机构,便于后续大葱铺放。借助理论分析及仿真试验,确定了挖掘、抖土、夹持输送等关键机构结构及参数。以损伤率、含杂率、损失率为试验指标,以偏心轮转速、抖栅振幅及夹持带倾角为试验因素进行三因素三水平正交试验设计,优化参数得到最优参数组合,并通过田间试验验证,试验结果表明:当偏心轮转速为 295 r/min、抖栅振幅为 28 mm、夹持带倾角为 38°时,自走式大葱联合收获机损伤率为 1.41%、含杂率为 3.02%、损失率为 0.44%,满足大葱低损机械化收获要求。

关键词: 大葱; 联合收获机; 正交试验; 参数优化; 田间试验

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0195-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Green Onion Combine Harvester

Wang Fangyan^{1,2} Liu Zunchao¹ Zhang Dekang¹ Qiu Zhuchuan¹ Jiang Runtian¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Smart Agricultural Equipment for Facility Horticulture, Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming to address the problems of easy clogging and high damage rate during the digging process of green onion harvesting, a harvesting scheme integrating digging, soil shaking, clamping and conveying processes and its working principle were determined, and a combined green onion harvester adapted to the ridge cultivation mode of green onions was designed. The machine adopted a digging device combining rotary tillage blades and a digging shovel; the rotary tillage blades cut and threw soil to remove most of the excess soil from green onion ridges, which can effectively reduce the digging resistance of the digging shovel during operation. An eccentric soil shaking mechanism was employed to effectively solve the soil accumulation problem, and a torsion mechanism was designed to facilitate the subsequent laying of green onions. Based on theoretical analysis and simulation tests, the structures and parameters of key devices such as the digging, soil shaking, clamping and conveying devices were determined. Taking damage rate, impurity rate and loss rate as the test indexes, and the rotational speed of the eccentric wheel, the amplitude of the soil shaking grid and the inclination angle of the clamping belt as the test factors, a three-factor and three-level orthogonal test was designed to optimize the parameters and obtain the optimal parameter combination, which was then verified by field tests. The test results showed that when the rotational speed of the eccentric wheel was 295 r/min, the amplitude of the soil shaking grid was 28 mm and the inclination angle of the clamping belt was 38°, the damage rate, impurity rate and loss rate of the self-propelled combined green onion harvester reached 1.41%, 3.02% and 0.44%, respectively, which met the requirements of low-damage mechanized harvesting of green onions.

Key words: green onion; combine harvester; orthogonal experiment; parameter optimization; field trial

0 引言

我国大葱种植面积和产量逐年增加,并逐渐形成了以山东、河南为代表的种植产区。大葱垄作的种植农艺,对机械化收获提出了更高要求。针对大葱规模化种植需求,研究大葱机械化收获技术及联合收获装备已成为大葱种植产业发展的必然^[1]。

当前,国外欧美大葱收获机以中大型为主,主要用于平作韭葱种植;日韩大葱收获机机具轻巧,对动力搭配及种植模式要求高。由于种植模式、大葱品种及配套动力差异,使得国外大葱收获技术及装备未能在我国推广应用。国产大葱收获机结构简单,功能单一,与国外大葱收获机相比,自动化程度及智能化水平较低。现有的分段收获方式,仅能完成大葱挖掘及抖土作业,且存在劳动强度高、作业效率低的问题。在借鉴国外收获技术及装备的基础上,青岛农业大学、山东农业大学等研制了大葱联合收获机,可以一次性完成大葱挖掘、输送和铺放工作,但在推广过程发现挖掘、清土等关键部件适应性还有待提升^[2-6]。

因此,针对自走式大葱联合收获机挖掘分土及抖动松土效果不佳、夹持扭转不稳等问题,本文研究大葱联合收获机关键部件结构参数,通过仿真分析和田间试验获得最佳工作参数组合,以提高大葱机械化作业水平,保证大葱收获质量和效率。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

大葱联合收获机主要由动力底盘、松土机构、挖掘机构、清土机构、夹持机构和扭转机构组成,如图1所示。其中,挖掘机构由旋耕刀组和挖掘铲组成,松土机构由抖动栅条和偏心轴承组成,夹持机构由拉簧、导向轮和输送带组成,扭转机构由2条平行扭转带组成。

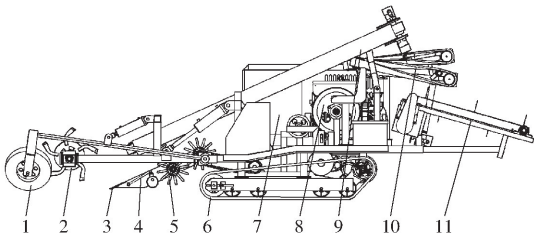


图1 大葱联合收获机结构示意图

Fig.1 Schematic of green onion combined harvester
1.限深轮 2.旋耕刀组 3.挖掘铲 4.抖土机构 5.清土辊
6.行走履带 7.液压油箱 8.发动机 9.夹持机构 10.扭转机构 11.收集机构

1.2 工作原理

作业时,利用液压传动系统将挖掘机构、松土机

构等调整至适合位置,满足挖掘深度要求。在限深轮辅助下,大葱联合收获机沿葱垄前进。两侧旋耕刀组将葱垄两侧土壤松碎、抛送。底部挖掘铲深入土壤对大葱根部进行挖掘。抖动栅条拍打大葱根部,对挖掘后堆积的大块土壤进行松碎,减少夹持阻力并降低收获含杂率。清土后的大葱在夹持输送带夹持下平稳向后输送,并在夹持机构末端喂入扭转机构。在扭转机构作用下,竖直喂入的大葱扭转为横向,最后落到大葱收集机构上,一次性完成大葱挖掘、清理、输送等工序。

1.3 主要参数

当前,山东大葱种植面积约占全国总量的1/6。经测定葱垄高为250~300 mm,垄距为750~800 mm,垄面宽为250~300 mm,垄面底宽为300~400 mm,大葱种植深度为250~300 mm,株距为50~70 mm。自走式大葱联合收获机参数如表1所示。

表1 大葱联合收获机主要参数
Tab.1 Main parameters of green onion combined harvester

参数	数值/形式
结构形式	履带自走式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 000×1 600×2 100
输出功率(柴油机)/kW	25.74
输出转速(柴油机)/(r·min ⁻¹)	2 500
前进速度/(km·h ⁻¹)	0.4~0.8
收获行数	1
收获行距/mm	750~800
挖掘深度/mm	0~300
挖掘宽度/mm	300
机具质量/kg	950
履带宽度/mm	180
履带中心距/mm	770

2 关键部件结构设计

2.1 挖掘抖土装置

2.1.1 挖掘机构结构

旋耕刀组位于挖掘铲两侧,主要完成葱垄两侧土壤的切碎及抛出,可降低挖掘阻力。结合大葱多样的收获条件,确定5个刀片组装的旋耕刀组结构。旋耕刀组与前进方向具有一定的倾斜角度,可减少刀具对葱叶的损伤。挖掘机构结构如图2所示。

2.1.2 旋耕刀组参数

葱垄高度为250~300 mm,确定旋耕刀片回转半径 r_2 为200 mm,刀盘半径 r_3 为100 mm。刀片结构参数直接影响土壤松碎及抛送效果,且旋耕刀片弯折角 α 影响切割阻力,正切面弯折半径 r_1 决定土壤

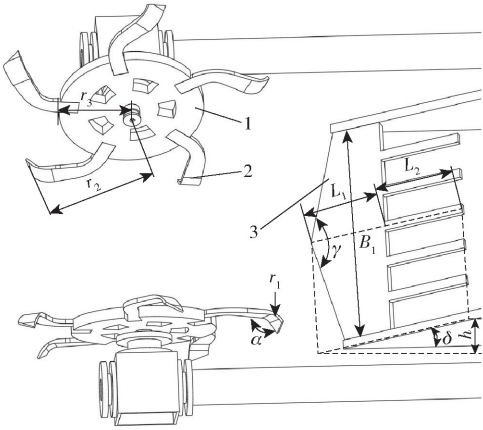


图 2 挖掘机构
Fig. 2 Digging mechanism
1. 刀盘 2. 刀片 3. 挖掘铲

抛送效果。参考常用旋耕刀具,取弯折角 α 为 130° ,正切面弯折半径 r_1 为 165 mm ^[7-9]。

旋耕刀组分割葱垄时,既不能损伤大葱,又要保证大葱不倾倒。旋耕刀组间距决定挖掘铲挖掘量和挖掘阻力。考虑大葱种植偏差和分布状态,确定旋耕刀组间距为 250 mm 。

旋耕刀转速 n 影响土壤切割和抛送效果,满足

$$n = \frac{60v}{KS} \tag{1}$$

式中 v ——机具前进速度, m/s
 K ——旋耕刀片数
 S ——切土节距, m

每侧刀组由 5 个旋耕刀片组成,确定 K 为 5,旱地作业时,切土节距 S 通常取 $0.1 \sim 0.12\text{ m}$,则旋耕刀转速为 $222 \sim 267\text{ r/min}$ 。

2.1.3 挖掘铲参数

挖掘铲是大葱收获机的关键部件,主要完成葱根底部的土壤切割和挖掘物的初步抬升^[10],如图 2 所示。挖掘铲入土角 δ 对挖掘阻力有直接影响,通常,挖掘铲入土角 δ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$,且入土角 δ 越小,挖掘铲挖掘阻力越小。但在相同挖掘深度下,入土角越小,所需挖掘铲铲面长度越长,为避免材料浪费,最终确定挖掘铲入土角 δ 为 25° ^[11-12]。

为提高挖掘铲割能力,铲面设置有铲尖,铲尖角度 γ 影响挖掘铲对土壤及葱根的切割性能,决定了铲面形状。铲尖角度太大,会增加挖掘铲与土壤接触面积,增加阻力;角度太小则会使挖掘铲铲面变长、强度减弱。为保证挖掘铲切割性能,铲尖角度 γ 应满足

$$\gamma \leq 90^\circ - \xi \tag{2}$$

式中 ξ ——挖掘铲与土壤摩擦角, $(^\circ)$

土壤与挖掘铲摩擦因数 $\tan \xi$ 取 0.4 ,故铲尖角度 γ 选择 135° ^[13]。

为保证大葱顺利挖掘并抬升,挖掘铲需在大葱根部以下,以避免大葱根部损伤。由图 2 可知,挖掘铲参数满足

$$L_1 + L_2 \leq \frac{h}{\cos \delta} \tag{3}$$

式中 L_1 ——挖掘铲长度, mm
 L_2 ——栅条长度, mm
 h ——挖掘深度, mm

一般平铲常用挖掘深度在 100 mm 以下。结合大葱种植特点与后续抖土需要,确定平铲长度 L_1 为 65 mm 、栅条长度 L_2 为 45 mm ,以便抖土机构顺利工作。挖掘铲宽度 B_1 应略大于旋耕刀组间距 (250 mm),确定宽度 B_1 为 260 mm 。

2.1.4 抖土机构结构与参数

大葱收获工作环境复杂,故采用偏心式抖土机构,通过凸轮带动装置,利用四杆机构原理实现栅条的往复运动,有效解决挖掘时壅土问题。抖土机构主要由抖动栅条和偏心轴承组成,结构简单,可靠性强,如图 3 所示。工作时,偏心轴承转动,推动抖动栅条抖动,实现挖掘物破碎及分离。

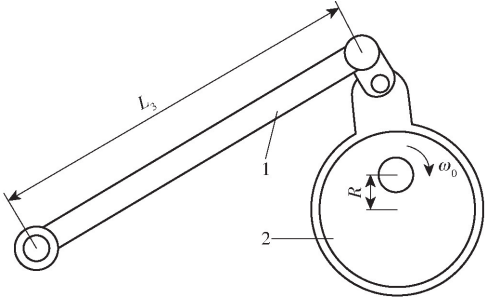


图 3 抖土机构
Fig. 3 Eccentric wheel earth-shaking device
1. 抖动栅条 2. 偏心轴承

收获期,大葱葱白直径为 $15 \sim 25\text{ mm}$ 。抖栅间隙应使松碎后的土壤可从中掉落,同时保证抖土机构可对拔出的大葱起到足够的支撑作用,故确定抖栅间距为 35 mm ,栅条直径为 10 mm 。结合挖掘铲结构尺寸,抖栅末端需略高于垄面,确定抖栅长度 L_3 为 220 mm 。参照马铃薯清土抖动频率,在防止挖掘物倾覆条件下,为保证土壤松碎效果,抖栅抖动频率应大于 4 Hz ,即偏心轮转速至少为 240 r/min ,栅条振动幅度应大于 25 mm ,即选用的标准偏心轴承偏心距 R 至少为 25 mm ^[14-16]。

2.2 夹持输送装置

大葱夹持输送装置主要分为夹持机构和扭转机构 2 部分,结构如图 4、5 所示。工作时,夹持机构主要完成大葱拔取和输送,扭转机构主要实现大葱位置形态的改变,使大葱从竖直转变为水平状态。

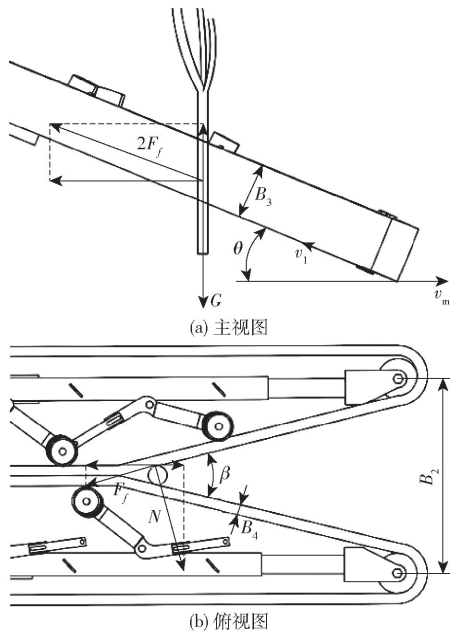


图 4 夹持机构
Fig. 4 Clamping mechanism

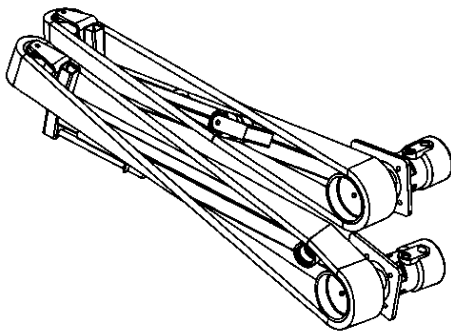


图 5 扭转机构
Fig. 5 Torsion mechanism

2.2.1 夹持机构参数

收获时,大葱在夹持带夹持下拔起,受力如图 4 所示。为保证大葱顺利喂入和拔起,夹持带喂入角 β 和夹持带倾角 θ 满足

$$F_f \sin \frac{\beta}{2} \geq N \cos \frac{\beta}{2} \tag{4}$$

其中 $2F_f \sin \theta \geq G \tag{5}$

$$F_f = \mu N \tag{6}$$

$$G = mg \tag{7}$$

可得 $\mu \geq \tan \frac{\beta}{2} \tag{8}$

$$\sin \theta \geq \frac{mg}{2F_f} \tag{9}$$

式中 F_f ——大葱受夹持带的摩擦力,N
 N ——大葱受夹持带的压力,N
 μ ——大葱与夹持带摩擦因数
 G ——大葱与土块重力,N
 m ——大葱与土块质量,kg
 g ——重力加速度, m/s^2

结合大葱葱白力学特性,确定作用于夹持带的夹持压力为 12 ~ 18 N,可满足无损夹持要求^[17-18]。由试验测定:大葱与夹持带摩擦因数为 0.7,大葱及土壤质量近似为 0.7 kg。根据式(8)、(9),可得 $\beta \leq 70^\circ, \theta \geq 20^\circ$,选择喂入角为 45° 。参考胡萝卜等夹持收获装置的常用夹持带角度^[19-22],夹持带倾角应大于 35° 。

对夹持带速度进行分析,速度 v_1 满足

$$v_1 \geq \frac{v}{\cos \theta} \tag{10}$$

参考机具前进速度为 0.4 ~ 0.8 km/h,考虑带传动打滑情况,选择夹持带速度为 1 km/h。

为保证夹持大葱时稳定性,结合大葱分布及重心位置、葱垄高度等特性^[23],确定夹持带喂入宽度 B_2 为 340 mm、海绵环形带宽度 B_3 为 75 mm、厚度 B_4 为 18 mm。

2.2.2 扭转机构参数

在扭转机构作用下,大葱运动姿态实时变动。扭转带完成 90° 转向,需满足基本长度要求。建立扭转带扭转长度计算坐标系,如图 6 所示。输送带扭转前,带宽 $B = l_{AC} = l_{EF}$,带长 $L = l_{OD}$,扭转后长度为 l_{AF} 。图 6 中扭转长度为夹持带扭转 90° 后伸长所形成的^[24]。

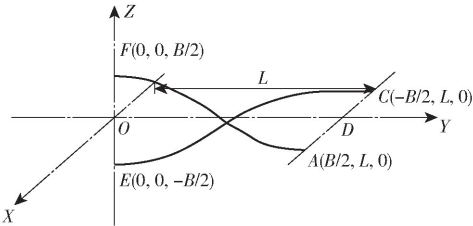


图 6 夹持带扭转长度示意图
Fig. 6 Schematic of torsion length of clamp band

由图 6 可知扭转后长度为

$$l_{AF} = \sqrt{(B/2)^2 + L^2 + (B/2)^2} = \sqrt{B^2/2 + L^2} \tag{11}$$

参考带式传送要求,扭转带长度应满足

$$L = \frac{B}{\sqrt{2\varepsilon^2 + 4\varepsilon}} \tag{12}$$

其中 $\varepsilon = (\sqrt{B^2/2 + L^2} - L)/L$

式中 ε ——扭转带实际应变

实际工作中,扭转带实际应变 ε 不能大于材料本身许用应变 $[\varepsilon]$ 。则

$$L \geq B / \sqrt{2[\varepsilon]^2 + 4[\varepsilon]} \approx B / (2\sqrt{[\varepsilon]}) \tag{13}$$

工作时,扭转带受到张力产生形变,则扭转带长为

$$l'_{AF} = l_{AF}\varepsilon' + l_{AF} = (1 + \varepsilon')l_{AF} \tag{14}$$

式中 l'_{AF} ——扭转带工作带长,mm
 ε' ——张力应变

此时总应变为

$$\varepsilon = \left(l'_{AF} - \frac{L}{2} \right) / \left(\frac{L}{2} \right) \tag{15}$$

同理,根据 $\varepsilon \leq [\varepsilon]$,得

$$L \geq B(1 + \varepsilon') / (2 \sqrt{[\varepsilon] - \varepsilon'}) \tag{16}$$

若不考虑扭转带工作张力产生的带边应变,则 $\varepsilon' = 0$ 。若 $\varepsilon' \neq 0$,则扭转带最小长度计算结果增大。扭转带在正常工作下应变与扭转带许用应变之比应小于 0.5。假定 $\varepsilon' / [\varepsilon] = 0.4$,由于扭转机构整体长度较短,且扭转带所受张力较小,采用橡胶与海绵结合的扭转带,橡胶材质带边许用伸长率一般不能超过 10%。结合以上分析并根据实际工作要求,确定扭转带扭转长度为 856 mm。

2.2.3 扭转机构仿真

在大葱扭转输送过程,扭转带会对葱白产生一定挤压力,易造成大葱损伤。参照团队前期对大葱力学试验结果,构建大葱模型及扭转带模型,各标定

参数如表 2 所示。

表 2 大葱物理特性
Tab.2 Physical properties of scallions

参数	数值
葱白平均直径/mm	25.68
葱白平均长度/cm	41.5
整株平均长度/cm	100.1
单株平均质量/g	220.56
大葱泊松比	0.30
大葱密度/(kg·m ⁻³)	800
大葱剪切模量/MPa	0.90
最低轴向平均抗压强度/MPa	0.33
最低径向平均抗压强度/MPa	0.17

利用 ANSYS 软件,分析扭转时大葱受力。假设作用于扭转带的夹持压力为 18 N。

采用六面体网格、自动网格划分算法进行网格划分,网格尺寸为 10 mm,精度等级为二级。划分完成后网格节点数为 205 020,单元格数量为 105 204。对大葱与扭转带进行约束,设定驱动轮转速为 112 r/min,得到等效位移云图、等效应力云图以及等效应变云图,如图 7 所示。

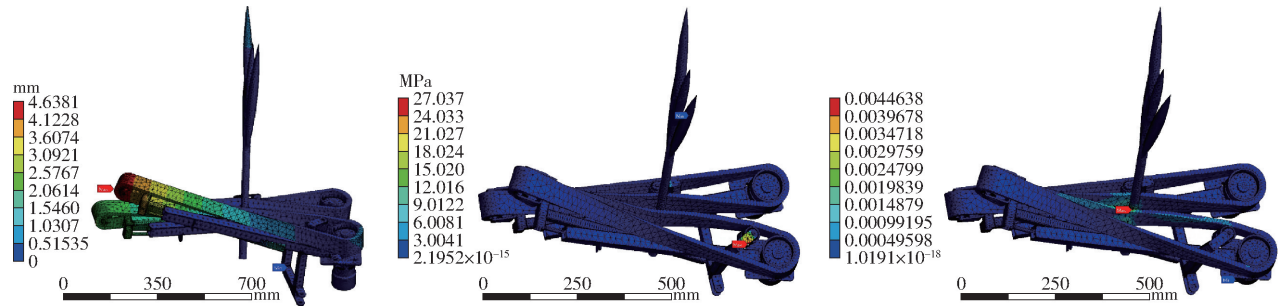


图 7 等效位移、应力、应变云图

Fig.7 Contour plots of equivalent displacement, stress, and strain

由图 7 可知,扭转带最大位移约为 4.64 mm、最大应力约为 27.04 MPa、最大应变为约 0.004,大葱最大位移约为 0.24 mm、最大应力约为 0.15 MPa、最大应变约为 1.97×10^{-3} 。

由仿真分析可得,在大葱扭转铺放过程,扭转带对大葱的压力小于大葱自身的抗压强度,且大葱扭转时产生的变形量小于所允许的最大变形量,满足扭转带及大葱不损伤的条件。

3 田间试验

3.1 试验设计

查阅文献[25]可知,偏心轮转速、栅条振幅是影响抖土机构运动状态即收获效果的主要因素。当偏心轮转速过快时,易造成机器零部件损坏,安全性低,大葱损伤率高;当转速过慢时,抖动栅条只起到一定的松土作用,去土效果不明显,导致含杂率上升。当抖动栅条振幅过大时,大葱及土块纵向位移

大,大葱铺放更易杂乱同时也易导致葱白折断;振幅过小时,清土去土效果不明显。当夹持带倾角过大时,会导致大葱夹持点上移,且与夹持带接触面积增加,提高大葱损伤的可能性;当夹持带倾角过小时,夹持带需更大的夹持力才能将大葱夹起,易造成大葱夹持处损伤。因此,夹持带角度也是影响收获效果的重要因素。

为确定大葱收获机工作参数,保证收获效果最佳,结合上述分析,以损伤率、含杂率及损失率作为响应值,对偏心轮转速、抖栅振幅及夹持带倾角进行响应面试验。通过更换不同齿数的链轮调整传动比,进而改变偏心轮转速;通过更换偏心距不同的偏心轴承改变抖栅振幅;夹持带绕后端定轴转动,通过改变夹持带前端销连接的连接点改变夹持带倾角。采用三因素三水平二次回归正交试验方案对影响损伤率、含杂率及损失率的 3 个因素进行参数组合优化。

试验因素及编码如表 3 所示。试验时,大葱收获机在偏心轮转速、抖栅振幅、夹持带倾角三因素组合下进行田间收获作业,以试验长度 10 m 为 1 个试验单位,单行收获,共进行 17 组试验。试验于 2024 年 10 月在潍坊青州市钢葱试验田进行,试验过程如图 8 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Experimental factors and codes

编码	因素		
	偏心轮转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	抖栅振幅/ mm	夹持带倾角/ ($^{\circ}$)
-1	240	25	32
0	270	30	35
1	300	35	38

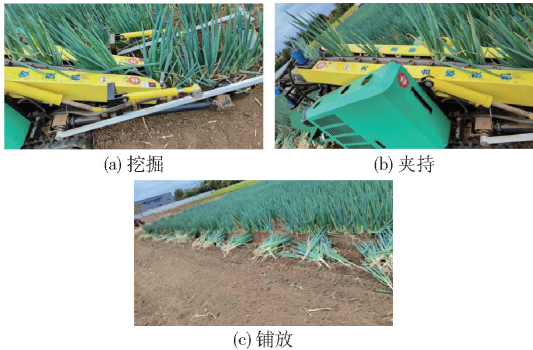


图 8 试验过程

Fig. 8 Experimental process

分别测定损伤率、含杂率和损失率。测试行程内大葱总质量与损伤(拔断、脱皮、挤扁等)质量,计算损伤率 Y_1 ,计算式为

$$Y_1 = \frac{W_1}{W} \times 100\% \tag{17}$$

式中 W_1 ——行程内损伤大葱质量,kg
 W ——行程内收获大葱总质量,kg

收获机含杂率测定应在试验区域内至少测定 3 个作业行程,并计算平均值。测试行程内大葱总质量与含杂(主要指根茎携带的泥土)质量,计算含杂率 Y_2 ,计算式为

$$Y_2 = \frac{W_2}{W} \times 100\% \tag{18}$$

式中 W_2 ——行程内收获大葱根茎叶以外杂质质量,kg

测试行程内大葱总质量与损失(漏拔、夹持输送落地)质量,计算损失率 Y_3 ,计算式为

$$Y_3 = \frac{W_3}{W} \times 100\% \tag{19}$$

式中 W_3 ——行程内损失大葱质量,kg

3.2 试验结果与分析

3.2.1 试验结果

依据 Box - Benhnken 试验原理设计三因素三水

平二次回归正交试验,试验方案与响应值如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 4 试验方案及结果

Tab. 4 Experimental scheme and results

序号	因素			损伤率	含杂率	损失率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	0	1	1.44	6.66	0.57
2	-1	-1	0	1.95	9.36	0.42
3	0	0	0	1.51	3.78	0.39
4	0	0	0	1.48	4.32	0.40
5	0	0	0	1.57	4.68	0.41
6	1	0	-1	2.05	3.42	0.36
7	0	1	1	1.64	4.32	0.58
8	0	-1	-1	2.14	6.63	0.35
9	0	0	0	1.51	4.32	0.42
10	1	0	1	1.54	2.70	0.57
11	1	-1	0	1.64	3.78	0.43
12	0	0	0	1.45	4.32	0.41
13	0	-1	1	1.32	5.58	0.54
14	0	1	-1	2.17	4.14	0.36
15	1	1	0	2.11	1.98	0.44
16	-1	1	0	1.83	5.04	0.42
17	-1	0	-1	2.14	6.12	0.57

3.2.2 回归模型建立与显著性分析

根据表 4 中试验数据,利用 Design-Expert 进行多元回归拟合分析,建立损伤率 Y_1 、含杂率 Y_2 、损失率 Y_3 对偏心轮转速 X_1 、栅条振幅 X_2 、夹持带倾角 X_3 3 个自变量的响应面回归模型,并对其进行显著性检验,结果如表 5 所示。回归方程分别为

$$Y_1 = 1.5 - 0.0025X_1 + 0.0875X_2 - 0.32X_3 + 0.145X_1X_2 + 0.0475X_1X_3 + 0.0725X_2X_3 + 0.1767X_1^2 + 0.2017X_2^2 + 0.1118X_3^2 \tag{20}$$

$$Y_2 = 4.28 - 1.91X_1 - 1.23X_2 - 0.1312X_3 + 0.63X_1X_2 - 0.315X_1X_3 + 0.3075X_2X_3 + 0.1567X_1^2 + 0.5992X_2^2 + 0.2843X_3^2 \tag{21}$$

$$Y_3 = 0.406 - 0.0013X_1 - 0.005X_2 + 0.0913X_3 + 0.0025X_1X_2 + 0X_1X_3 - 0.0175X_2X_3 + 0.012X_1^2 + 0.0095X_2^2 + 0.037X_3^2 \tag{22}$$

由表 5 可知,损伤率 Y_1 、含杂率 Y_2 、损失率 Y_3 模型显著性 $P < 0.01$,表明回归模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,表明回归方程拟合度高。对于损伤率 Y_1 , X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 影响极显著 ($P < 0.01$), X_1X_3 影响显著 ($P < 0.05$);对于含杂率 Y_2 , X_1 、 X_2 影响极显著 ($P < 0.01$), X_1X_2 、 X_2^2 影响显著 ($P < 0.05$);对于损失率 Y_3 , X_3 、 X_3^2 影响极显著 ($P < 0.01$),其余为不显著。

表 5 方差分析
Tab.5 Analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
损伤率 Y_1	模型	1.39	9	0.154 7	102.42	<0.000 1 **
	X_1	0.000 1	1	0.000 1	0.033 1	0.860 8
	X_2	0.061 3	1	0.061 3	40.56	0.000 4 **
	X_3	0.819 2	1	0.819 2	542.52	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.087 0	1	0.087 0	57.63	0.000 1 **
	X_1X_3	0.009 0	1	0.009 0	5.98	0.044 4 *
	X_2X_3	0.021 0	1	0.021 0	13.92	0.007 3 **
	X_1^2	0.131 5	1	0.131 5	87.11	<0.000 1 **
	X_2^2	0.171 4	1	0.171 4	113.50	<0.000 1 **
	X_3^2	0.052 6	1	0.052 6	34.82	0.000 6 **
	残差	0.010 6	7	0.001 5		
	失拟项	0.002 7	3	0.000 9	0.446 1	0.733 4
	误差	0.007 9	4	0.002 0		
	总和	1.40	16			
含杂率 Y_2	模型	46.05	9	5.12	21.49	0.000 3 **
	X_1	29.26	1	29.26	122.92	<0.000 1 **
	X_2	12.18	1	12.18	51.15	0.000 2 **
	X_3	0.137 8	1	0.137 8	0.578 9	0.471 6
	X_1X_2	1.59	1	1.59	6.67	0.036 3 *
	X_1X_3	0.396 9	1	0.396 9	1.67	0.237 6
	X_2X_3	0.378 2	1	0.378 2	1.59	0.247 9
	X_1^2	0.103 5	1	0.103 5	0.434 6	0.530 8
	X_2^2	1.51	1	1.51	6.35	0.039 8 *
	X_3^2	0.340 2	1	0.340 2	1.43	0.270 8
	残差	1.67	7	0.238 1		
	失拟项	1.25	3	0.417 2	4.02	0.106 0
	误差	0.414 7	4	0.103 7		
	总和	47.72	16			
损失率 Y_3	模型	0.075 3	9	0.008 4	30.90	<0.000 1 **
	X_1	0.000 0	1	0.000 0	0.046 2	0.836 0
	X_2	0.000 2	1	0.000 2	0.738 8	0.418 5
	X_3	0.066 6	1	0.066 6	246.06	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.000 0	1	0.000 0	0.092 3	0.770 0
	X_1X_3	0.000 0	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
	X_2X_3	0.001 2	1	0.001 2	4.53	0.071 0
	X_1^2	0.000 6	1	0.000 6	2.24	0.178 2
	X_2^2	0.000 4	1	0.000 4	1.40	0.274 8
	X_3^2	0.005 8	1	0.005 8	21.29	0.002 4 **
	残差	0.001 9	7	0.000 3		
	失拟项	0.001 4	3	0.000 5	3.53	0.127 5
	误差	0.000 5	4	0.000 1		
	总和	0.077 2	16			

注：*表示差异显著(0.01 ≤ P < 0.05)，**表示差异极显著(P < 0.01)。

3.2.3 交互因素对指标的影响

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行处理并绘制响应面,根据响应面考察偏心轮转速、抖栅振

幅、夹持带倾角间的交互作用对损伤率、含杂率的影响。由试验结果及方差分析可知,对于损失率,偏心轮转速及抖栅振幅影响不显著,显著项只有夹持带倾角,故无需进行交互因素响应面分析,且损失率变化较小,在可接受范围之内,后续参数优化中可忽略不计。

偏心轮转速、抖栅振幅、夹持带倾角显著交互项对损伤率、含杂率的响应面如图 9 所示。

由图 9a 可知,当夹持带倾角处于零水平时,若抖栅振幅不变,损伤率随偏心轮转速增加先降低后升高;若偏心轮转速不变,损伤率随着抖栅振幅增加先降低后升高。

由图 9b 可知,当抖栅振幅处于零水平时,若夹持带倾角不变,损伤率随偏心轮转速增加先降低后升高;若偏心轮转速固定,损伤率随着夹持带倾角增加而增大。

由图 9c 可知,当偏心轮转速处于零水平时,若夹持带倾角固定,损伤率随抖栅振幅增加先降低后升高;若抖栅振幅不变,损伤率随着夹持带倾角增加而增大。

由图 9d 可知,当夹持带倾角处于零水平时,若抖栅振幅不变,含杂率随着偏心轮转速增加而减小,若偏心轮转速不变,含杂率随着抖栅振幅增加而减小。

3.2.4 参数优化

根据自走式大葱收获机设计要求,要求损伤率不高于 5.8%、含杂率不高于 5%,目标函数和约束为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \leq 5.8\% \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \leq 5\% \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

利用 Design-Expert 对三因素进行优化求解圆整后得最优解:偏心轮转速为 295 r/min,抖栅振幅为 28 mm,夹持带倾角为 38°,此时大葱损伤率预测值为 1.37%,含杂率预测值为 2.96%。

3.3 结果验证

于 2024 年 11 月在潍坊青州市刚葱试验田进行收获试验,如图 10 所示。土壤为壤土,容重为 1.5 g/cm³,含水率为 16.37%。参照 Q/0781QHL01—2017《大葱收获机》,将大葱收获机工作参数设置为最优工作参数验证其可靠性,进行 5 次重复试验,测定并计算主要性能指标,结果如表 6 所示。

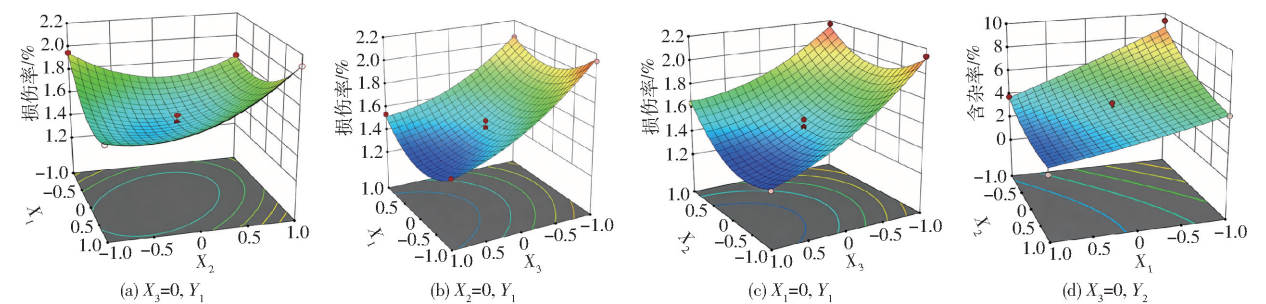


图9 交互因素响应面

Fig. 9 Response surfaces of interaction factors



图10 收获过程

Fig. 10 Harvesting process

表6 田间收获试验结果

Tab. 6 Results of field harvest experiment %			
试验序号	损伤率 Y_1	含杂率 Y_2	损失率 Y_3
1	1.41	3.50	0.50
2	1.24	3.30	0.38
3	1.25	2.30	0.43
4	1.38	3.20	0.53
5	1.77	2.80	0.35
平均值	1.41	3.02	0.44

由表6可知,大葱收获损伤率平均值为1.41%,含杂率平均值为3.02%,与Design-Expert预测值误差小于5%,说明该最优参数组合具有参考价值,损失率平均值为0.44%,符合大葱收获要求。

4 结论

(1)设计了大葱收获机关键部件尺寸与参数。

采用旋耕刀与挖掘铲组合的挖掘机构,有效降低了大葱挖掘阻力;采用海绵夹持输送带实现了大葱平稳无损作业。采用偏心式抖土机构,利用四杆机构原理,将偏心轮的转动转换为抖动栅条的上下摆动,可有效解决挖掘土壤时的堆积问题;采用扭转机构实现了大葱由直立到水平的体位转换,便于收获后大葱的有序铺放。

(2)通过理论设计,确定了挖掘机构和抖土机构结构参数及范围,设计了由夹持、扭转构成的2级夹持输送装置,确定了带长、倾角等主要结构参数。

(3)利用ANSYS仿真分析,确定扭转过程海绵夹持带最大位移约为4.64 mm、最大应力约为27.04 MPa,大葱位移约为0.24 mm、应力约为0.15 MPa,满足大葱无损夹持要求。

(4)以偏心轮转速、抖栅振幅、夹持带倾角为试验因素,损伤率、含杂率、损失率为评价指标,对自走式大葱收获机进行三因素三水平正交试验设计,建立回归模型并对试验因素交互项进行显著性分析,得到最优参数组合:偏心轮转速为295 r/min、抖栅振幅为28 mm、夹持带倾角为38°。以最优参数进行田间试验,结果表明,自走式大葱联合收获机平均损伤率为1.41%、含杂率为3.02%,损失率为0.44%,满足大葱收获要求。

参 考 文 献

[1] 宋国义,刘玉恒,刘朔,等. 浅析大葱机械化收获技术[J]. 农业技术与装备,2020(9):86-87.
Song Guoyi, Liu Yuheng, Liu Shuo, et al. Analysis on mechanized harvesting technology of welsh onion[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2020(9):86-87. (in Chinese)

[2] 刘学峰,张军强,刘学串,等. 4CZ-1型大葱联合收获机液压系统设计研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(9):118-123.
Liu Xuefeng, Zhang Junqiang, Liu Xuechuan, et al. Design and research of hydraulic system for 4CZ-1 onion combined harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(9):118-123. (in Chinese)

[3] 王方艳. 大葱生产技术与收获装备[J]. 农业工程, 2017, 7(5):1-4.
Wang Fangyan. Production technology and harvesting equipment of green Chinese onion[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(5):1-4. (in Chinese)

[4] 王方艳,孙光全,尚书旗. 4CL-1型自走式大葱联合收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24):39-47.
Wang Fangyan, Sun Guangquan, Shang Shuqi. Development of 4CL-1 self-propelled combine harvester for green onion[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24):39-47. (in Chinese)

[5] 胡军. 挠性圆盘式大葱移栽机的优化设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2003.
Hu Jun. The optimum design method and tests of a scallion transplanter with two flexible metal disks[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)

- [6] 戴飞,赵武云,史瑞杰,等. 自走式胡麻联合收割机设计与试验[J]. 中国油料作物学报,2022,44(3):678-686.
Dai Fei,Zhao Wuyun,Shi Ruijie,et al. Design and experiment on self-propelled flax combine harvester[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2022,44(3):678-686. (in Chinese)
- [7] 邱祝川,潘永菲,王方艳. 可调式分土装置的设计及试验[J]. 农机化研究,2024,46(9):180-185.
Qiu Zhuchuan,Pan Yongfei,Wang Fangyan. Design and test of adjustable soil separating device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(9):180-185. (in Chinese)
- [8] 丁为民,徐志刚,汪小函. 斜置旋耕刀滑切角及其方程[J]. 农业工程学报,2002,18(3):49-53.
Ding Weimin,Xu Zhigang,Wang Xiaohan. Grass sliding cutting angles and their equations of oblique rotary blades[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(3):49-53. (in Chinese)
- [9] 鄂智. 反转旋耕刀排列方式优化与离散元仿真研究[D]. 成都:西华大学,2019.
E Zhi. Optimization of inverted rotary cutter arrangement and simulation of discrete element[D]. Chengdu:Xihua University,2019. (in Chinese)
- [10] 侯加林,陈彦宇,李玉华,等. 铲筛组合式大葱挖掘抖土疏整装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(18):29-39.
Hou Jialin,Chen Yanyu,Li Yuhua,et al. Design and experiment of shovel-screen combined green onion digging,shaking, and soil tillage device[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(18):29-39. (in Chinese)
- [11] 杨然兵,李国莹,尚书旗,等. 机械化挖掘收获部件发展现状与展望[J]. 农机化研究,2008,30(9):5-9.
Yang Ranbing,Li Guoying,Sang Shuqi,et al. Research advances and prospects of mining mechanical harvesting parts[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(9):5-9. (in Chinese)
- [12] 贾晶霞,张东兴,郝新明,等. 基于计算机模拟的马铃薯挖掘铲参数优化与试验分析[J]. 中国农业大学学报,2005,10(5):38-41.
Jia Jingxia,Zhang Dongxing,Hao Xinming,et al. Parameters optimization and experiments of potato digger blade based on computer simulation[J]. Journal of China Agricultural University,2005,10(5):38-41. (in Chinese)
- [13] 王家胜,尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报,2012,28(12):38-43.
Wang Jiasheng,Shang Shuqi. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(12):38-43. (in Chinese)
- [14] 蔡延淞,于皓河,胡鑫,等. 马铃薯收获机除杂装置试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(6):62-68.
Cai Yansong,Yu Haohe,Hu Xin,et al. Experimental study on potato harvester debris removal device[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2024,45(6):62-68. (in Chinese)
- [15] 杨虎. 川芎收获机振动筛振动特性及减振研究[D]. 成都:西华大学,2024.
Yang Hu. Research on vibration characteristics and reduction of Chuanxiong harvester's vibration screen[D]. Chengdu:Xihua University,2024. (in Chinese)
- [16] 姚自力,杨自栋,王寒松,等. 基于振动挖掘与二次分选的4U-90型番薯收获机设计与试验[J]. 农业工程,2023,13(8):100-106.
Yao Zili,Yang Zidong,Wang Hansong,et al. Design and test of 4U-90 type sweet potato harvester based on vibration excavation and secondary sorting[J]. Agricultural Engineering,2023,13(8):100-106. (in Chinese)
- [17] 张静,王俊,杜冬冬,等. 履带自走式单行大白菜收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):134-146.
Zhang Jing,Wang Jun,Du Dongdong,et al. Design and experiment of crawler self-propelled single-row harvester for Chinese cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):134-146. (in Chinese)
- [18] 李志红,区颖刚. 甘蔗收获机圆弧轨道式柔性夹持输送装置的功率模型[J]. 农业工程学报,2009,25(9):111-116.
Li Zhihong,Qu Yinggang. Power model of arc-track-type flexible holding and conveying device of sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(9):111-116. (in Chinese)
- [19] 金鑫,杜新武,王世光,等. 胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(3):82-89.
Jin Xin,Du Xinwu,Wang Shiguang,et al. Design and experiment of stems cutting device for carrot harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):82-89. (in Chinese)
- [20] Jin Y,Wang J,Chen J,et al. Design and experiment for flexible clamping and conveying device for green leafy vegetable orderly harvesting[J]. Agriculture,2024,14(6):967.
- [21] 李青江,孙志民,任庆菊,等. 连续铺放自走式大葱联合收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(9):1-7,14.
Li Qingjiang,Sun Zhimin,Ren Qingju,et al. Design and test of continuous laying self-propelled combine harvester for scallion[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(9):1-7,14. (in Chinese)
- [22] 单伊尹,廖庆喜,万星宇,等. 油菜薹对行自走式收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):93-104.
Shan Yiyin,Liao Qingxi,Wan Xingyu,et al. Design and experiment of self-propelled six-row harvester for oilseed rape shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):93-104. (in Chinese)
- [23] 张涛,李英,宋树民,等. 基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):162-169,190.
Zhang Tao,Li Ying,Song Shumin,et al. Design and experiment of tumorous stem mustard harvester based on flexible gripping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(S2):162-169,190. (in Chinese)
- [24] 李嘉鹏,郭春林,范方荣. 带式输送机输送带翻转角度研究[J]. 煤炭技术,2023,42(2):211-214.
Li Jiapeng,Guo Chunlin,Fan Fangrong. Research on belt reversal angle of belt conveyor[J]. Coal Technology,2023,42(2):211-214. (in Chinese)
- [25] Wan L,Li Y,Liu Z,et al. Study on behavior rules of the licorice-soil-licorice oscillating harvester coupled system using numerical method[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,226:109479.