

菠菜分体铲式入土仿形切割装置设计与试验

刘立晶^{1,2} 梁树建^{1,2} 刘芳建^{1,2} 周刘磊^{1,2} 崔巍^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;

2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对现有叶类蔬菜土下切割部件采用的一体式带刀无法适应菠菜宽幅垄面横向起伏, 导致切根失败的问题, 本文设计一种分体铲式入土仿形切割装置, 旨在降低垄面条件对菠菜切根效果的影响。通过运动分析确定铲刀运动方式, 结合离散元仿真, 得到铲刀主要结构参数。根据铲刀运动要求, 设计曲柄连杆-平行四杆组合式传动机构。通过机构-土壤互作受力分析, 确定仿形机构整体结构与压缩弹簧结构参数。利用复数矢量法构建传动机构数学模型, 根据铲刀切割轨迹优化分析, 确定切割部件随地表上下浮动过程, 前进速度与曲柄角速度间的速比系数与仿形杆件纵坐标函数关系, 并通过田间试验验证切割轨迹优化结果的准确性。基于最优切割轨迹得到分体铲式入土仿形装置最佳作业参数组合: 曲柄角速度 18.85 rad/s、速比系数 7.92 mm/rad, 此时平均切根合格率为 95.23%。最优作业参数组合下, 开展了仿形机构作业性能验证试验, 结果显示留根长度保持在 11 mm ± 3 mm 范围内, 平均留根变异系数为 37.96%。对比现有一体式带刀采收装备与分体铲式切割装置作业效果, 结果显示分体铲式切割装置留根变异系数平均降低约 63.42 个百分点, 切根合格率平均提高约 17.4 个百分点。研究结果为菠菜收获机研究提供了新的切割方式, 为整机研发提供了部件支撑。

关键词: 菠菜采收; 分体铲式; 入土切割; 地表仿形; 切割轨迹

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0129-12

OSID:



Design and Test of Split-body Shovel into Soil Copying Cutting Device for Spinach

LIU Lijing^{1,2} LIANG Shujian^{1,2} LIU Fangjian^{1,2} ZHOU Liulei^{1,2} CUI Wei^{1,2}

(1. Chinese Academy of Mechanized Agriculture Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to address the problem that existing integrated blade-type underground cutting devices for leafy vegetables cannot adapt to the lateral undulations of wide ridges in spinach cultivation, leading to root cutting failures, a split-body shovel into soil copying cutting device was designed to reduce the impact of ridge conditions on spinach root cutting effectiveness. The shovel's motion mode was determined through motion analysis, and the main structural parameters of the shovel were obtained by using discrete element simulation. Based on the shovel's motion requirements, a crank-connecting rod-parallel four-bar linkage transmission mechanism was designed. Through mechanism-soil interaction force analysis, the overall structural parameters of the contour-following mechanism and the compression spring were determined. A mathematical model of the transmission mechanism was constructed by using the complex vector method. Based on the shovel cutting trajectory optimization analysis, the speed ratio coefficient between the forward velocity and crank angular velocity during the up-and-down movement of the cutting component with the ground surface was determined, along with the functional relationship between the longitudinal coordinates of the contour-following rods. Field trials verified the accuracy of the optimized cutting trajectory results. Based on the optimal cutting trajectory, the best operating parameter combination for the split-shovel type soil-entry contour-following device was obtained: crank angular

收稿日期: 2025-01-14 修回日期: 2025-02-02

基金项目: 北京市科技计划项目(Z221100006422007)

作者简介: 刘立晶(1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械关键技术与装备研究, E-mail: xylilj@sina.com

通信作者: 刘芳建(1987—), 男, 研究员, 博士, 主要从事蔬菜收获装备与技术研究, E-mail: 553527875@qq.com

velocity was 18.85 rad/s, speed ratio coefficient was 7.92 mm/rad, at which the average root cutting qualification rate was 95.23%. Under the optimal combination of operating parameters, a performance verification test of the contour-following mechanism was conducted. The results showed that the root length was maintained within the range of 11 mm ± 3 mm, with an average root length variation coefficient of 37.96%. Comparing the operating effects of existing integrated blade harvesting equipment and split-shovel cutting devices, the results showed that the split-shovel cutting device reduced the root length variation coefficient by an average of approximately 63.42 percentage points and increased the root cutting qualification rate by an average of approximately 17.4 percentage points. The research results can provide a novel cutting method for spinach harvester research and offer component support for the overall machine development.

Key words: spinach harvesting; split shovel type; cutting into ground; surface profiling; cutting path

0 引言

我国菠菜产量占世界的 90% 以上,菠菜作为普通叶类蔬菜代表之一,具有极高的营养价值^[1-3]。采收工作基本由人工完成,面临劳动力日益短缺、劳动成本日益提高的现状,菠菜采收装备研究尤为重要。菠菜机械收获一般包含切割、输送、归集 3 个主要作业环节,切割部件位于装备前端,其作业效果决定收获质量^[4]。与欧美国家菠菜土上切割、不带根采收方式不同,我国消费市场要求菠菜土下切割、带根采收,因此国外机型无法适应国内采收需求。按割刀形式分类,普通叶类蔬菜切割部件主要有双刀往复式、环状带刀式、铲刀式、一体带刀式 4 种形式^[5-9],现有土下切割采收装备多为一体带刀式。而菠菜通常宽幅垄作,由于一体式带刀作业过程中只能保持直线,对垄面进行整体切割,无法适应宽幅垄面横向起伏的复杂作业条件,易切散菠菜,因此需要对土下切割部件进一步研究。

近年来,普通叶类蔬菜土下切割部件研究主要集中于机械结构与割深控制两方面。胡敏^[10]对比了菱形曲面铲、三角直铲、矩形直铲入土效果,结果表明三角直铲入土阻力最低。苑进等^[8]针对菠菜收获提出破土铲根作业方法,设计了一种可聚拢菠菜的三角形根切铲,便于后续夹持收集,但该铲刀仅由机具前进带动切割,导致切割速度较低。FUJISAWA 等^[11-12]为减少由割刀运动引起的土壤位移,结合离散元分析与田间试验提出一种土下弧形切割路径,并验证了切割路径的有效性。TAKAYAMA 等^[13]针对弧形切割路径导致的菠菜留根长度不均匀问题,利用激光传感器与高度控制单元优化了切割路径,确保切割过程中割刀刃口始终沿运动轨迹的切向方向,结果显示菠菜留根长度集中于 25 ~ 30 mm,提高了留根一致性。

针对一体式带刀在菠菜宽幅垄面条件下适用性差的问题,本文设计一种分体铲式入土仿形切割装

置,以降低宽幅垄面起伏不平对菠菜切根效果的影响,提高土下切割部件作业适应性。

1 菠菜种植农艺与装置整体结构

1.1 菠菜种植农艺与生长特点

菠菜条播种植要求行距 15 ~ 20 cm,播种深度 2 ~ 3 cm,生长期 45 ~ 50 d,可随消费要求适时采收^[14]。以北京地区大叶菠菜为研究对象,该地区菠菜采用温室内宽幅垄作条播种植(图 1),单垄 6 行,行距 15 cm,株距 3 ~ 4 cm,垄高 18 cm,垄沟宽 20 cm,垄面宽 90 cm,垄底宽 110 cm。菠菜品种为该地区种植范围较广的中蔬 19F56 大叶菠菜,植株茎叶部分平均高度 23 ~ 27 cm,根据菠菜种植农艺符合采收条件^[15]。

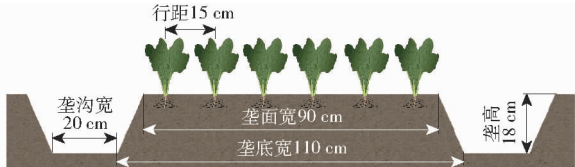


图 1 菠菜种植条件示意图

Fig. 1 Schematic of spinach planting conditions

1.2 切割装置整体结构与工作原理

1.2.1 整体结构与主要参数

铲式切割装置整体结构如图 2 所示,主要由驱动装置、行走装置、机架、铲式切割部件等组成。驱动装置主要包括控制器、铲刀驱动电机、减速器与传动轴等,在控制器作用下,铲刀驱动电机可实现无级

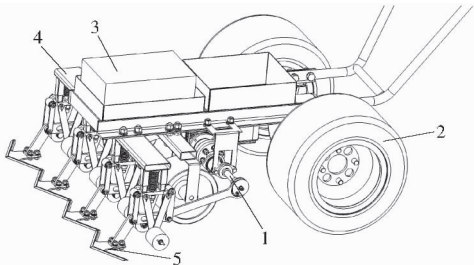


图 2 分体铲式切割装置整体结构

Fig. 2 Overall structure of split shovel type cutting device

1. 驱动装置 2. 行走装置 3. 电源 4. 机架 5. 铲式切割部件

变速,单输入双输出式的减速器将电机动力同步输出至两侧传动轴,保证切割部件同步运动;行走装置与机架固连,主要包括后桥总成、行走电机、减速器等,行走装置由垄上通过,相较于垄沟通过的机具,约束了切割装置整体宽度,提高了狭小空间作业通过性;铲式切割部件与机架和驱动装置连接,分为 4 个切割单体,各单体既同步运动,又根据地表起伏独立调节切割深度。切割装置技术参数如表 1 所示。

表 1 分体铲式切割装置技术参数

Tab.1 Technical parameters of split-type shovel cutting device

参数	数值/形式
结构形式	手扶式
驱动结构形式	电动后轮两驱
行走方式	垄上直线行走
仿形机构形式	机械被动仿形
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 800×900×900
作业幅宽/mm	900
切割深度/mm	10~25
铲刀切割速度/(m·s ⁻¹)	0~0.5
铲刀驱动电机转速/(r·min ⁻¹)	0~1 500
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.05~0.25

1.2.2 铲式切割部件工作原理

铲式切割部件结构如图 3 所示,主要包括铲刀、传动机构和仿形机构。传动机构包括偏心盘、驱动杆、上连杆、下连杆以及连杆,仿形机构包括仿形轮、支撑杆以及压簧。入土切根过程中,铲式切割部件随切割装置匀速前进,作业电机输出动力减速增扭后分配给两侧传动轴,传动轴同步驱动 4 组偏心盘,偏心盘带动驱动杆进而推动连杆高频摆动,铲刀与下连杆螺栓连接,做前后往复运动,铲刀在设定切割深度下完成入土切根。同时在压簧作用下,4 组仿形轮始终贴合垄面。随垄面横纵向起伏,4 组铲刀独立上下浮动,保证 4 组铲刀同步完成入土切根的同时,始终以垄面为基准,以固定深度切断菠菜根,避免将菠菜切散,确保留根整齐。

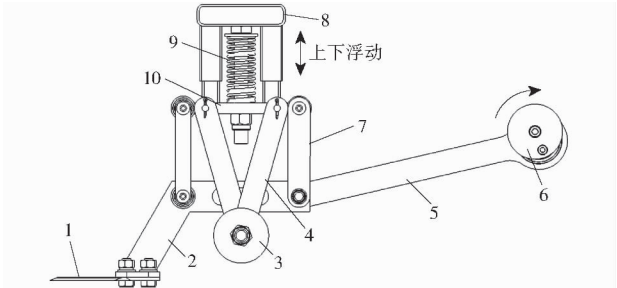


图 3 铲式切割部件结构

Fig.3 Shovel type cutting component structure

1. 铲刀 2. 下连杆 3. 仿形轮 4. 支撑杆 5. 驱动杆 6. 偏心盘 7. 连杆 8. 机架 9. 压簧 10. 上连杆

2 铲式切割部件结构设计

2.1 铲刀运动分析

菠菜根主要由 1 条主根和若干须根组成。自然条件下,菠菜主根在土壤内保持竖直;须根细长并向四周生长,紧密穿插在土壤间隙内,连接土壤因形成网状的根土复合体结构。由于不同深度土壤含水率存在差异,同一根系与土壤粘结状态在不同位置也不尽相同等诸多复杂因素^[16],菠菜根土复合体呈各向异性力学特性。不失一般性,取铲刀入土切根过程菠菜根内一点 O,置于 Oxyz 空间坐标系,该点位于铲刀刃口处(图 4),y 轴为前进方向,x 轴为垄面横向,z 轴为竖直方向,t 轴为刃口切线方向,n 轴为刃口法线方向。

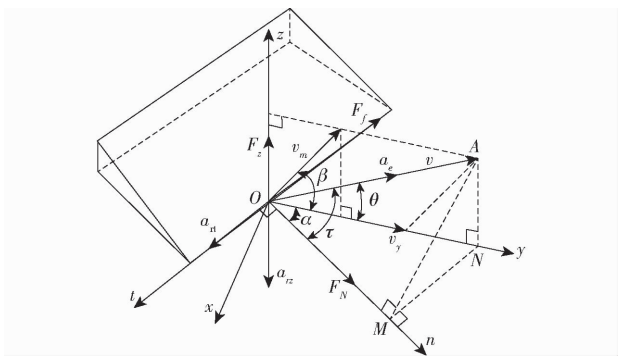


图 4 铲刀滑切运动受力分析

Fig.4 Sliding cutting motion and force analysis of blade

分析速度关系可知

$$\begin{cases} v = \sqrt{v_m^2 \sin^2 \beta + (v_y + v_m \cos \beta)^2} \\ \theta = \arctan(v_m \sin \beta (v_y + v_m \cos \beta)^{-1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 v ——铲刀绝对运动速度,m/s
 v_m ——传动机构带动铲刀的切割速度,m/s
 v_y ——装置行进速度,m/s
 β —— v_m 与 v_y 夹角,(°)
 θ —— v 与 y 轴夹角,(°)

自速度矢量 v 终点 A 向 y 轴作垂线,垂足为 N,自点 N 向 n 轴作垂线,垂足为 M,则线段 AM 垂直于 n 轴。根据几何关系可知

$$\tau = \arcsin \frac{\sqrt{(v_y + v_m \cos \beta)^2 \sin^2 \alpha + v_m^2 \sin^2 \beta}}{\sqrt{(v_y + v_m \cos \beta)^2 + v_m^2 \sin^2 \beta}} \quad (2)$$

式中 τ ——铲刀滑切角,(°)
 α —— n 轴与 y 轴夹角,(°)

由式(2)可知, τ 随 β 改变呈周期性变化,周期为 2π 。区间 $[-\pi, 0]$ 与区间 $[0, \pi]$ 中 τ 随 β 增大均先增大后减小,当 v_y 与 v_m 共线时, τ 为最小值 α 。当 τ 最大时,令此时 $|\beta| = \beta_t$, β_t 仅与 v_y 、 v_m 相关。当 v_y 与 v_m 同号时,二者取定义域内任意非零实数,都存

在 $\beta_i \geq \pi$, 则 β 在 $[-\pi, \pi]$ 内, τ 随 $|\beta|$ 增大单调增大; 当 v_y 与 v_m 异号时, 二者取定义域内任意非零实数, 都存在 $\beta_i \leq \pi$, 则 β 在 $[-\pi, \pi]$ 内, 随 $|\beta|$ 增大, τ 先增大后减小。当 $|\beta| > \pi$ 时, v_m 沿 y 轴分速度方向与 v_y 相反, 不具备切割作用, 故实际作业过程要求 $|\beta| \leq \pi$, 即 v_y 与 v_m 同号, 其他因素不变情况下, $|\beta|$ 越大铲刀切割越省力。另一方面, $|\beta|$ 过大导致竖直方向分速度增加, 铲刀挖掘作用增强, 入土切根过程中增大土壤扰动程度, 造成土壤上抛, 污染菠菜。分析表明: 当铲刀绝对运动速度与装置前进速度间在竖直方向存在适当偏角时, 能起到增大滑切角、减小切割阻力的作用, 但为避免偏角过大造成土壤扰动, 选取 $|\beta| \leq \pi/18$ 。

2.2 铲刀参数

参照文献[10、17], 装置采用三角形铲刀, 该类型入土性能强, 切割阻力较小。刃口形式有单刃口与双刃口2种, 在刀具材质与质量相同情况下, 单刃口刀具所需剪切力小于双刃口刀具^[18], 故设计铲刀结构如图5所示, 材料为65Mn钢, 关键参数包括铲刀宽度 w 、铲刃夹角 ε 、前刃口角 φ_1 、后刃口角 φ_2 、厚度 d 。

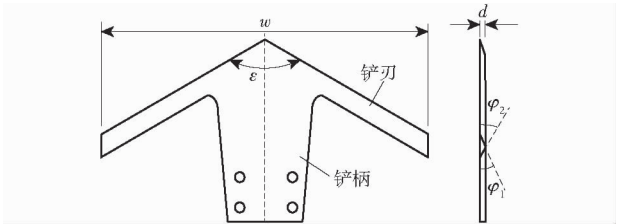


图5 铲刀结构示意图

Fig.5 Schematic of shovel blade structure

2.2.1 铲刀宽度

铲刀宽度 w 由有效割幅决定。垄面宽为0.9 m, 有效割幅为0.8 m, 将割幅均分为4段(图6), 取 w 为0.205 m。

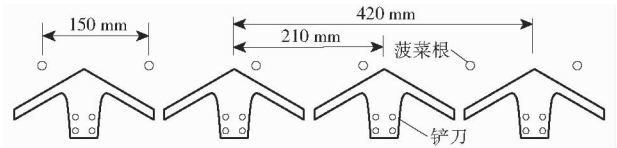


图6 铲刀布置方式

Fig.6 Blade layout

2.2.2 铲刃夹角

由图4可知, 铲刀动力学微分方程为

$$\begin{cases} ma_e \sin \theta - ma_{rz} = F_z \\ ma_e \cos \theta \cos \alpha = F_N \\ ma_e \cos \theta \sin \alpha - ma_{rt} = F_f \end{cases} \quad (3)$$

式中 m ——质点质量, kg
 a_e ——质点牵连加速度, m/s²

a_{rz} ——质点沿 z 轴负方向相对加速度, m/s²
 a_{rt} ——质点沿 t 轴相对加速度, m/s²
 F_z ——质点受到沿 z 轴的作用力, N
 F_N ——质点受到沿 n 轴的挤压力, N
 F_f ——质点受到沿 t 轴负方向的摩擦力, N

当切割过程中铲刀与质点间存在沿 t 轴的相对运动趋势时, 存在

$$F_f = F_N \tan \psi \quad (4)$$

式中 ψ ——铲刀与菠菜根间摩擦角, (°)

将式(4)代入式(3)得

$$a_{rt} = a_e \cos \theta \frac{\sin(\alpha - \psi)}{\cos \psi} \quad (5)$$

当铲刀与质点间沿 t 轴存在相对滑动时, $a_{rt} > 0$, 则要求 $\alpha > \psi$ 。随 α 增大, 铲刀两刃口夹角减小, 导致割幅减小。结合文献[18], 选取 $\alpha = 30^\circ$, 铲刃夹角 $\varepsilon = 120^\circ$ 。

2.2.3 前刃口角、后刃口角与厚度

前刃口角 φ_1 影响铲刀入土性能, 过大切削性能差; 过小则刃口强度削弱、磨损加剧, 影响铲刀使用寿命。传统往复式切割装置动、定刀片刃口角一般为 $18^\circ \sim 20^\circ$ ^[19], 饲草切碎机割刀刃口角一般为 $12^\circ \sim 22^\circ$ ^[20], 深松铲刀口角一般为 $32^\circ \sim 45^\circ$ ^[21-22]。作业过程前刃破土, 需较强切割能力; 后刃只需切削已松散的土壤, 故设置 $\varphi_1 < \varphi_2$ 。铲刀厚度与切割能力相关。过厚铲刀成本增加, 整体过重, 运动惯性大, 切割性能较差; 过薄铲刀强度低, 作业可靠性差。综合考虑铲刀作业深度与切割要求, 选定 $20^\circ \leq \varphi_1 \leq 30^\circ, 30^\circ \leq \varphi_2 \leq 40^\circ, 3 \text{ mm} \leq d \leq 5 \text{ mm}$ 。

为探究 φ_1 、 φ_2 、 d 对铲刀入土剪切力的影响, 标定了菠菜栽培土壤离散元模型, 标定后土壤参数如表2所示。

表2 铲刀入土仿真模型参数

Tab.2 Parameters of simulation model of shovel sinking

材料	参数	数值
土壤	密度/(kg·m ⁻³)	1.503 × 10 ³
	泊松比	0.35
	剪切模量/Pa	1 × 10 ⁷
65Mn 钢	密度/(kg·m ⁻³)	7.861 × 10 ³
	泊松比	0.30
	剪切模量	7.9 × 10 ¹⁰
土壤-土壤	恢复系数	0.350
	静摩擦因数	0.294
	滚动摩擦因数	0.067
	表面能/(J·m ⁻²)	0.243
土壤-65Mn 钢	恢复系数	0.350
	静摩擦因数	0.450
	滚动摩擦因数	0.125

以铲刀入土最大剪切力 F_d 最小为评价指标,进行单因素仿真试验,试验过程见图 7。设定铲刀切割深度为 20 mm,往复频率为 4 Hz,固定计算步长 5×10^{-6} s,为排除试验偶然性,各组试验均重复 3 次,试验结果如图 8 所示,图中 P~U(p~u)表示同一因素不同水平间的显著差异性。



图 7 铲刀入土切割仿真试验

Fig. 7 Simulation test of blade cutting into soil

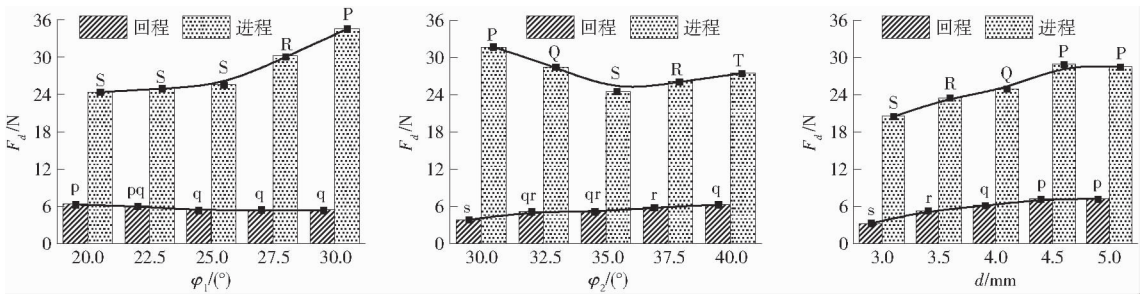


图 8 铲刀入土剪切单因素试验结果

Fig. 8 Single factor test results of shearing effect of shovel blade entering soil

2.3 传动机构设计

根据铲刀运动分析可得传动机构设计要求:
①应驱动铲刀前后周期性振动,左右方向无运动。
②铲刀竖直方向具有分速度。
③运动过程中铲刀保持固定角度,不发生翻转。综合设计要求,传动机构设计为曲柄连杆-平行四杆组合机构(图 9)。

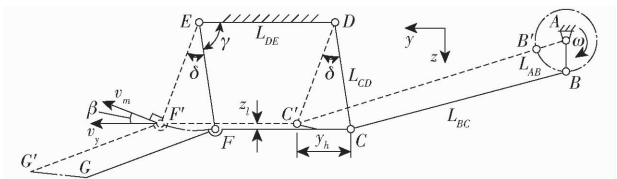


图 9 传动机构运动分析

Fig. 9 Transmission mechanism motion analysis

由图 9 可得

$$\gamma = \frac{\pi}{2} + \beta \quad (6)$$

式中 γ ——杆 DE 与杆 EF 夹角, (°)

将传动机构置于平面坐标系,以点 A 为原点,已知 DE 杆水平,杆长 $L_{DE} = 105$ mm,点 D 坐标 $y_D = 218$ mm, $z_D = -4.4$ mm。当连杆 BC 与曲柄 AB 共线时,连杆 CD 与 EF 处于摆动临界状态,存在

$$\begin{cases} \gamma_{\max} = \arccos \frac{L_{CD}^2 + L_{AD}^2 - (L_{AB} + L_{BC})^2}{2L_{AD}L_{CD}} - \arctan \frac{z_D}{y_D} \\ \gamma_{\min} = \arccos \frac{L_{CD}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} - L_{AB})^2}{2L_{AD}L_{CD}} - \arctan \frac{z_D}{y_D} \end{cases} \quad (7)$$

分析可知:铲刀入土剪切过程中回程 F_d 远小于进程,且随 φ_1 增大,进程 F_d 单调增大,回程 F_d 单调减小。 φ_1 为 20° 、 22.5° 、 25° 对进程最大剪切力无显著差异,其对进程 F_d 影响显著,对回程 F_d 无明显影响,综合考虑入土性能与前刃口强度,取前刃口角为 25° 。随 φ_2 增大,进程 F_d 先减小再增大,回程 F_d 单调增大,其对铲刀进、回程 F_d 均有显著影响。 $\varphi_2 = 35^\circ$ 时进程 F_d 最小,故取后刃口角为 35° 。随厚度 d 增加,进程、回程 F_d 均单调增大,其对铲刀进、回程最大剪切力均有显著影响。 $d = 3$ mm 时 F_d 最小,故取厚度为 3 mm。

式中 $\gamma_{\max}$ —— γ 最大值, (°)

$\gamma_{\min}$ —— γ 最小值, (°)

L_{CD} ——连杆 CD 长度, mm

L_{AD} ——A、D 间直线距离, mm

L_{AB} ——曲柄 AB 长度, mm

L_{BC} ——摇杆 BC 长度, mm

当 γ 为最小时,铲刀即将沿 y 轴作加速运动,此时铲刀需向下切割未被扰动过的紧实土壤,要求切割性能高,需较大滑切角,此时应取 β 为 $\pi/18$,则 $\gamma_{\min}$ 为 $4\pi/9$;当 γ 为最大时,铲刀即将沿 y 轴负方向作加速运动,此时应减小竖直方向分速度,避免铲刀回撤过程中造成的多余土壤扰动,此时应取 β 为 0° ,则 $\gamma_{\max}$ 为 $\pi/2$, $\delta_{\max}$ 为 $\pi/18$ 。根据几何关系可得

$$\begin{cases} y_{h\max} = L_{CD} \sin \delta_{\max} \\ z_{l\max} = L_{CD} (1 - \cos \delta_{\max}) \\ \delta_{\max} = \gamma_{\max} - \gamma_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $y_{h\max}$ ——单个运动周期内铲刀沿 y 轴的最大切割幅度, mm

$z_{l\max}$ ——单个运动周期内铲刀沿 z 轴的最大切割幅度, mm

$\delta_{\max}$ ——单个运动周期内 CD 杆最大摆动幅度, (°)

经测定采收期菠菜根最大直径约 10 mm,若铲刀在相邻运动周期间隙恰好切割菠菜根,易造成二

次切根,故要求铲刀在单个周期内完全切断菠菜根,即 $y_{hmax} > 10\text{ mm}$ 。另一方面,若 y_{hmax} 过大, z_{lmax} 同样增大,增强土壤扰动,加剧机组振动。为留有切割余量,选取 y_{hmax} 为 14 mm , L_{CD} 取整为 80 mm ,此时 $z_{lmax} \approx 1.22\text{ mm}$,代入式(7)、(8)取整后得 $L_{AB} = 9\text{ mm}$, $L_{BC} = 223\text{ mm}$ 。

2.4 地表仿形机构设计

2.4.1 仿形机构整体结构

为应对作业垄面土壤紧实度不均匀情况,需设计地表仿形机构实时调节各铲刀入土深度。仿形探测装置根据其与作业部件的相对位置可分为前置仿形、同步仿形与后置仿形,根据地表起伏感知方式可分为接触式与非接触式^[23]。由于菠菜种植密度大,不适用前置仿形与同步仿形方式,本文采用后置接触式仿形机构,整体结构如图 10 所示,图中 L_{IJ} 表示点 I 到点 J 的距离,为 65 mm , L_{IH} 表示杆 IH 长度, l_c 表示压簧安装长度,为 70 mm , h_{FC} 表示铲刀到杆 FC 的竖直高度,为 66 mm , h_{HC} 表示铲刀理论切割深度, h_{HK} 表示仿形轮与支撑轮间高度差。

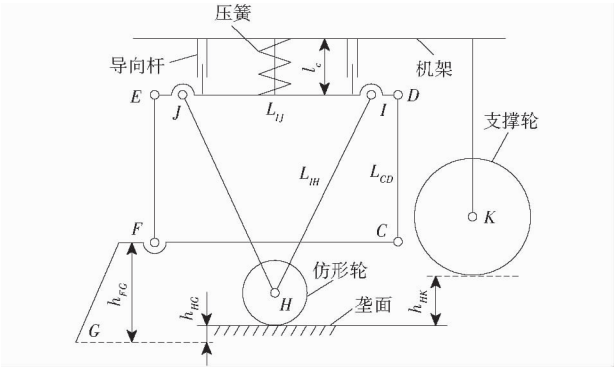


图 10 仿形机构整体结构
Fig. 10 Overall structure of copying mechanism

由于菠菜茎叶与根连接部位均位于地表以下 $5 \sim 10\text{ mm}$,市场普遍要求留根长度为 $5 \sim 20\text{ mm}$,故选取 h_{HC} 为 20 mm 。设定仿形轮直径 d_H 为 40 mm ,支撑轮直径 d_K 为 170 mm ,根据几何计算取整得 L_{IH} 为 111 mm 。当仿形机构处于作业状态时,仿形轮与支撑轮均与地面接触,机架部分重量压缩弹簧,仿形轮受压簧下压力始终紧贴地面,设此时弹簧长度减小至 l_s ,可得

$$h_{HK} = l_c - l_s \tag{9}$$

为确保工作状态下弹簧具有足够压缩量和伸长量,选取弹簧工作行程 l_n 为 20 mm ,令 $h_{HK} = 0.5l_n$,易知 $l_s = 60\text{ mm}$, $h_{HK} = 10\text{ mm}$ 。

2.4.2 压缩弹簧选型

实际情况下,菠菜种植垄面土壤松软,仿形轮、支撑轮、驱动轮作业过程中均会挤压土壤,导致土壤凹陷。设机架整体质量为 M ,仿形轮质量为 m_H ,支

撑轮质量为 m_K ,驱动轮质量为 m_Q ,其余杆件质量忽略不计。假设土壤凹陷各处对轮胎压强相等,仿形轮、支撑轮、驱动轮陷入土壤深度分别为 ΔH 、 ΔK 、 ΔQ ,受土壤压强分别为 P_H 、 P_K 、 P_Q 。装置整体结构与土壤互动过程如图 11 所示。

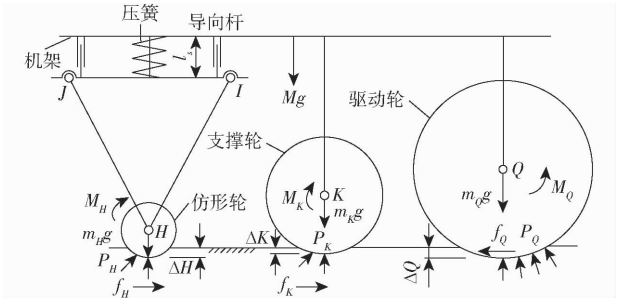


图 11 切割装置-土壤互动过程示意图
Fig. 11 Schematic of cutting device - soil interaction process

假设切割装置工作时仿形轮、支撑轮与驱动轮纯滚动。取仿形轮为研究对象,受力分析如图 12 所示。

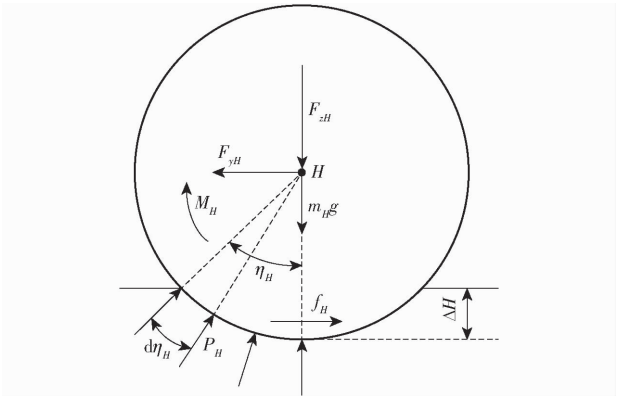


图 12 仿形轮受力分析
Fig. 12 Force analysis of imitation wheel

当装置匀速前进时,存在

$$\begin{cases} F_{zH} + m_Hg = \int_0^{\eta_H} \frac{1}{2} d_H P_H L_H \cos \eta_H d\eta_H \\ F_{yH} = f_H = \int_0^{\eta_H} \frac{1}{2} d_H P_H L_H \sin \eta_H d\eta_H \\ M_H = \frac{1}{4} d_H^2 P_H L_H \int_0^{\eta_H} \cos \eta_H \sin \eta_H - \sin \eta_H (1 - \cos \eta_H) d\eta_H \\ \eta_H = \arccos \frac{d_H - 2\Delta H}{d_H} \end{cases} \tag{10}$$

式中 F_{zH} ——仿形轮受到竖直方向支反力, N
 F_{yH} ——仿形轮受到前进方向支反力, N
 η_H ——仿形轮与土壤作用夹角, rad
 d_H ——仿形轮直径, mm
 L_H ——仿形轮宽度, mm
 f_H ——土壤对仿形轮的摩擦力, N
 M_H ——土壤对仿形轮的滚动摩阻, N·mm
由于仿形轮与支撑轮均为从动轮,故支撑轮受力

$$L_{AB}e^{i\theta_1} + L_{BC}e^{i\theta_2} = L_{CD}e^{i\theta_3} + L_{AD}e^{i\theta_4} \quad (14)$$

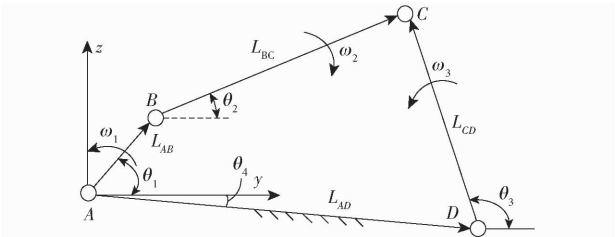


图 15 四杆机构矢量多边形

Fig. 15 Four-bar mechanism vector polygon

式中 L_{AD} ——点 A 与点 D 间直线距离, mm

θ_1 ——杆 AB 方位角, rad

θ_2 ——杆 BC 方位角, rad

θ_3 ——杆 CD 方位角, rad

θ_4 ——杆 AD 方位角, rad

应用欧拉公式分离式 (14) 的实部和虚部, 得

$$\begin{cases} L_{AB} \cos \theta_1 + L_{BC} \cos \theta_2 = L_{CD} \cos \theta_3 + L_{AD} \cos \theta_4 \\ L_{AB} \sin \theta_1 + L_{BC} \sin \theta_2 = L_{CD} \sin \theta_3 + L_{AD} \sin \theta_4 \end{cases} \quad (15)$$

易知点 B 坐标 $y_B = L_{AB} \cos \theta_1, z_B = L_{AB} \sin \theta_1$, 点 D

坐标 $y_D = L_{AD} \cos \theta_4, z_D = L_{AD} \sin \theta_4$, 式 (15) 可改写为

$$\begin{cases} y_B + L_{BC} \cos \theta_2 = L_{CD} \cos \theta_3 + y_D \\ z_B + L_{BC} \sin \theta_2 = L_{CD} \sin \theta_3 + z_D \end{cases} \quad (16)$$

则 $\theta_2 = \arcsin \frac{L_{CD} \sin \theta_3 + z_D - z_B}{L_{BC}} \quad (17)$

令 $\tan \mu = \frac{z_B - z_D}{y_B - y_D}$, 则在 $\triangle BCD$ 中, $\angle BDC = \mu -$

θ_3 , 有

$$\theta_3 = \mu - \arccos \frac{(y_B - y_D)^2 + (z_B - z_D)^2 + L_{CD}^2 - L_{BC}^2}{2L_{CD} \sqrt{(y_B - y_D)^2 + (z_B - z_D)^2}} \quad (18)$$

式 (14) 对时间求导得

$$L_{AB} \omega_1 e^{j\theta_1} + L_{BC} \omega_2 e^{j\theta_2} = L_{CD} \omega_3 e^{j\theta_3} \quad (19)$$

式中 ω_1 ——曲柄 AB 角速度, rad/s

ω_2 ——连杆 BC 角速度, rad/s

ω_3 ——摇杆 CD 角速度, rad/s

将实部和虚部分离并求解得

$$\begin{cases} \omega_3 = \frac{\omega_1 L_{AB} \sin(\theta_1 - \theta_2)}{L_{CD} \sin(\theta_3 - \theta_2)} \\ \omega_2 = \frac{\omega_1 L_{AB} \sin(\theta_1 - \theta_3)}{L_{BC} \sin(\theta_3 - \theta_2)} \end{cases} \quad (20)$$

设点 C 沿 y 轴分速度为 v_{my} , 结合式 (20) 可得

$$v_{my} = \frac{L_{AB} \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin \theta_3}{\sin(\theta_3 - \theta_2)} \omega_1 \quad (21)$$

由于机构尺寸与初始安装位置均已确定, 当压缩弹簧长度不变时, 铲刀各运动周期内沿 y 轴最大回程速度 $v_{my}^{\max}$ 必对应同一曲柄方位角 $\theta_1^{\max}$ 。为进一步优化铲刀切割轨迹, 取弹簧形变量为工作行程一半时的切割部件为研究对象, 根据仿真分析此时 θ_1

与 v_{my} 的曲线关系如图 16 所示。

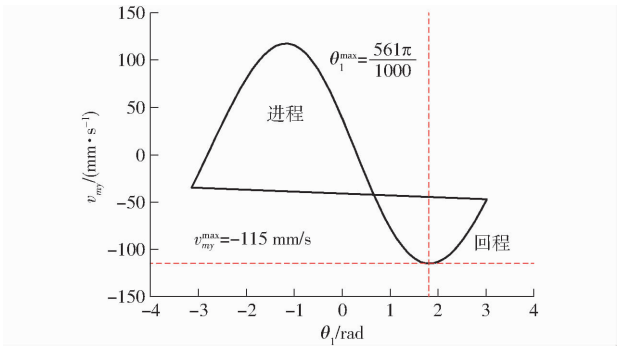


图 16 θ_1 与 v_{my} 的曲线关系

Fig. 16 Relationship between θ_1 and v_{my}

由图 16 可知 $\theta_1^{\max} = 561\pi/1\,000$ 。由式 (17)、(18)、(21) 可得

$$v_{my}^{\max} = 9.15\omega_1 \quad (22)$$

根据 v_y 与 $v_{my}^{\max}$ 关系得 3 种铲刀切割路径 (图 17)。令铲刀自初始最高点至下一最高点为 1 个切割周期, 周期为 2π , 水平位移为 Y, 期间经历一次最低切割点。切割周期内, 铲刀由最高点运动至最低点的切割轨迹较平缓, 具有入土切根作用, 称为切根过程; 最低点至下一最高点切割轨迹水平位移与竖直位移接近, 期间 v_{my} 方向始终与前进方向相反, 可使切割周期快速过渡, 称为过渡过程, 水平位移为 δy 。若铲刀在过渡过程恰好切根, 易导致二次切根或切口不平整。为提高铲刀切根质量, 需最大限度减小 δy , 提高铲刀在切根过程完成切根的概率。

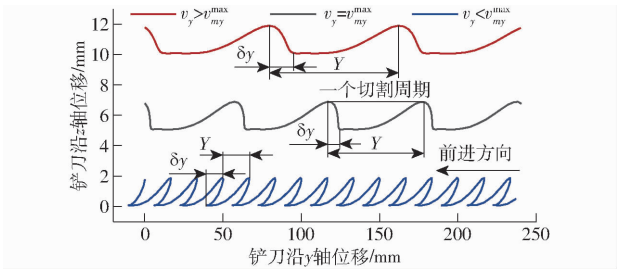


图 17 铲刀切割轨迹分析

Fig. 17 Schematic of blade cutting path

根据传动机构设计可知, 铲刀位于最低点时 $\theta_1 = 391\pi/1\,125$, 铲刀位于初始最高点时 $\theta_1 = -1\,789\pi/2\,000$, 则

$$\delta y = \left(\frac{2\,211\pi}{2\,000} - \frac{391\pi}{1\,125} \right) \frac{v_y}{\omega_1} - \int_{\frac{22\,357\pi}{18\,000\omega_1}}^{\frac{2\,211\pi}{2\,000}} \int_{\frac{391\pi}{1\,125}}^{\frac{2\,211\pi}{2\,000}} \omega_3 L_{CD} \sin \theta_3 d\theta_1 dt \quad (23)$$

当 δy 趋近于零时, 则有

$$v_y = 7.92\omega_1 \quad (24)$$

令速比系数 $\rho = v_y/\omega_1$, 同理得 z_D 与 ρ 的关系曲线如图 18 所示。

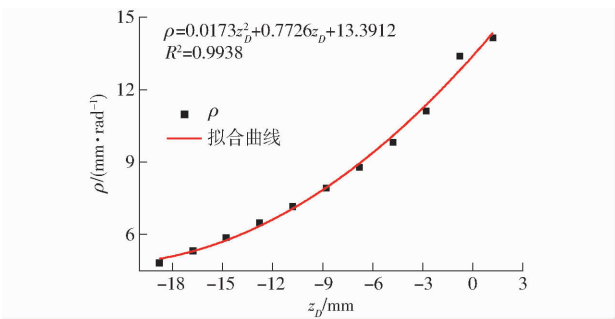


图 18 z_D 与 ρ 的曲线关系

Fig. 18 Relationship between z_D and ρ

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证分体铲式入土仿形切割装置的田间作业

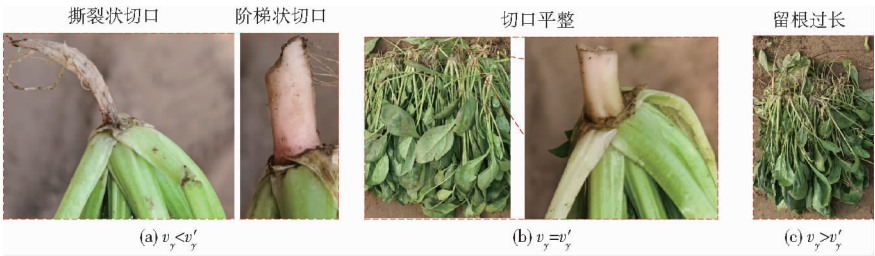


图 19 不同前进速度下切口状态对比

Fig. 19 Comparison of incision state at different forward speeds

由图 19 可看出, $v_y < v'_y$ 时, 铲刀切根过程中, 过渡过程与切根过程有较大重叠部分, 相同前进距离内, 过渡过程占比增大, 导致铲刀在一个运动周期内未完整切根, 下一周期在不同切割深度处完成切根概率提高, 造成撕裂状和阶梯状切口; $v_y > v'_y$ 时, 铲刀切根轨迹平缓, 入土铲切能力减弱, 导致铲刀带动土壤将菠菜根整体推出, 造成留根过长; $v_y = v'_y$ 时, 切口平整, 无明显切口异常、留根过长现象。对比可知, 按照切割轨迹优化结果设定装置前进速度可明显提高切割后菠菜根切口质量。

完成验证试验后, 统计不同前进速度下的作业效果。设定铲刀完整切断菠菜根, 且留根长度在 5 ~ 20 mm 之间为切根合格, 统计各试验区区间切根合格株数 T_1 , 切口异常株数 T_2 , 则切根合格率 η_1 、切口异常率 η_2 统计结果如图 20 所示。

由图 20 可知, $v_y < v'_y$ 时, 随 v_y 增加, η_2 显著减小, η_1 基本保持不变; $v_y > v'_y$ 时, 随 v_y 增加, η_1 显著减小, η_2 基本保持不变; $v_y = v'_y$ 时, η_1 、 η_2 均处于最优水平, 综合对比不同前进速度下切口状态与作业效果, 表明铲刀切割轨迹优化结果在保持高切根合格率的同时, 可确保切口平整, 使切割装置作业状态达到最佳。

3.3 切割装置作业参数优化试验

为得到分体铲式切割装置最佳工作参数, 以曲

性能, 于 2024 年 11 月在北京通州区中农富通园艺有限公司温室设施内开展田间试验。试验地采用条播种植, 单垄 6 行, 垄面宽 120 cm, 行距 20 cm, 株距 3 ~ 5 cm。菠菜品种为欧兰德川崎 4 号, 生长 52 d, 平均株高约 23 cm。试验前划分若干试验区间, 长度为 2 m, 并统计各区间菠菜总株数 T_0 。

3.2 铲刀切割轨迹优化验证试验

本试验应用控制变量法, 锁定 z_D 为 - 8.8 mm, 则 ρ 为 7.92 mm/rad。根据预试验结果, 切割装置作业参数 ω_1 为 18.85 rad/s, 记此时装置最优前进速度为 v'_y , 按照切割轨迹理论分析, v'_y 为 0.15 m/s。为验证铲刀切割轨迹优化结果准确性, 对比分析装置实际前进速度 v_y 与 v'_y 不同时的切口状态, 试验结果如图 19 所示。

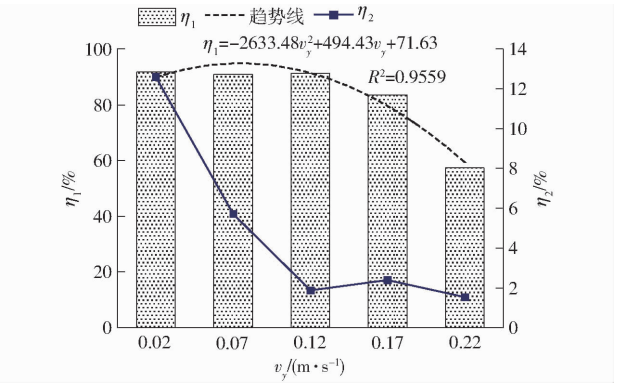


图 20 不同前进速度下作业性能参数变化

Fig. 20 Variations of operational performance parameters at different forward speeds

柄角速度 ω_1 、速比系数 ρ 为试验因素, 以切根合格率 η_1 为评价指标开展作业参数优化单因素试验, 试验过程如图 21 所示。

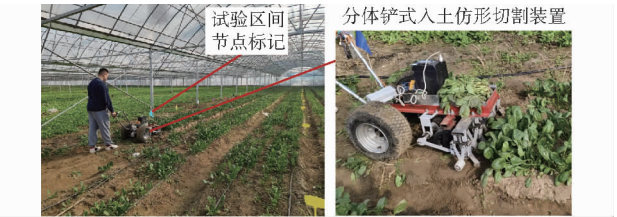


图 21 田间试验过程

Fig. 21 Field experiment process

考虑电机转速, 结合上述研究, 确定影响因素取

值范围,试验因素水平如表 3 所示。

表 3 试验因素水平
Tab.3 Test factors and levels

因素	水平				
	1	2	3	4	5
$\omega_1/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	14.66	16.76	18.85	20.94	23.04
$\rho/(\text{mm}\cdot\text{rad}^{-1})$	4.83	5.88	7.92	11.12	14.16

为避免试验偶然性,各组作业参数分别在 3 个不同区间内完成试验,试验结果如图 22 所示,图中 $p \sim r$ 表示同一因素不同水平间的显著差异性。

由图 22 可知, ω_1 对 η_1 影响显著, ω_1 为 14.66、16.76 rad/s 间无显著差异,与其余 3 个水平存在显著差异,当 ω_1 为 18.85 rad/s 时, η_1 最大,为 93.71%; ρ 对 η_1 影响显著, ρ 为 4.83、5.88、7.92 mm/rad 水平间无显著差异,与其余 2 个水平存在显著差异,当 ρ 为 7.92 mm/rad 时, η_1 最大,为 93.44%,故确定最优作业参数组合 ω_1 为 18.85 rad/s, ρ 为 7.92 mm/rad。以最优参数组合重复试验,得到平均切根合格率为 95.23%,表明分体铲式切割装置作业效果良好。

3.4 仿形机构作业性能验证试验

文献[24-25]采用土壤紧实度评价起垄镇压效果,说明土壤紧实度可一定程度表征作业垄面土壤条件,故本文根据铲刀理论入土深度,采用等距取

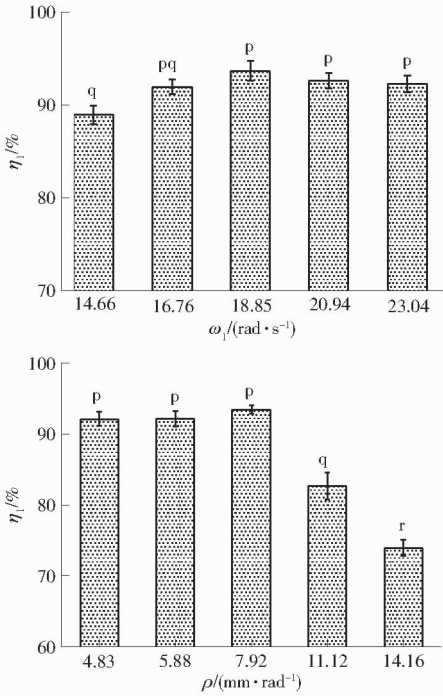


图 22 作业参数优化单因素试验结果
Fig.22 Results of single factor experiment of operation parameter optimization

点法测量各区间垄面下 2 cm 的土壤紧实度,结果见图 23。为验证仿形机构作业性能,沿垄面横、纵向统计割后菠菜根留根长度,以留根变异系数为评价指标,其值为留根长度标准差与平均值比值,开展验证试验,结果见图 24。

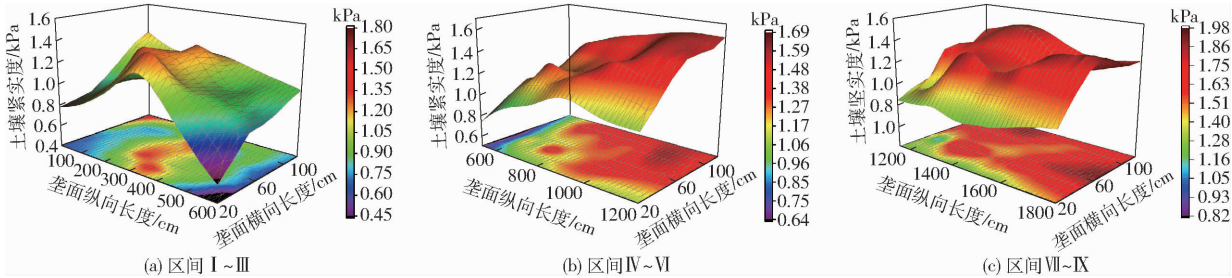


图 23 仿形机构验证试验垄面土壤紧实度统计结果
Fig.23 Statistical results of soil firmness on test ridges verified by imitation mechanism

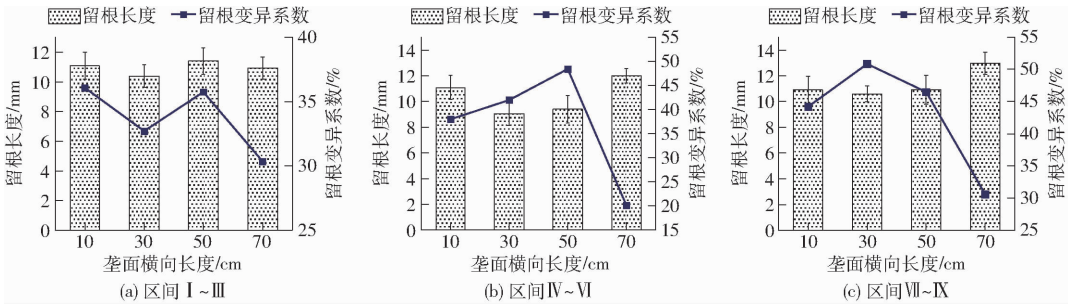


图 24 仿形机构作业性能验证试验结果

Fig.24 Operation performance verification test results of copying mechanism

由图 23、24 可知,当纵向土壤紧实度极差为 0.3 ~ 1.5 kPa 时,留根变异系数为 40% ~ 50%;当纵向土壤紧实度极差小于 0.3 kPa,留根变异系数为

20% ~ 30%,平均留根变异系数为 37.96%。横向土壤紧实度普遍高于 0.5 kPa,而各行间平均留根长度最大相差不超过 3 mm。整体来看,垄面土壤紧实

度对仿形机构作业性能存在一定影响,但在试验垄面横、纵向土壤紧实度均有波动的条件下,留根长度多保持在 $11\text{ mm} \pm 3\text{ mm}$ 范围内,说明仿形机构以及铲刀分体布局方式可适应该作业条件,作业性能良好。

3.5 装置作业对比试验

为验证分体铲式切割装置作业优势,以一体带刀式采收装备 4VL-120 型蔬菜收获机为参照对象,在同一温室内开展对比试验,其主要技术参数如表 4 所示,切割部件对比见图 25,试验垄面土壤紧实度统计结果见图 26,试验结果见图 27。

表 4 4VL-120 型蔬菜收获机技术参数
Tab.4 Technical parameters of 4VL-120 type vegetable harvester

参数	数值/形式
结构形式	手扶式
驱动结构形式	电动后轮两驱
行走方式	垄上直线行走
仿形机构形式	自动仿形
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	2 460×1 500×1 200
作业幅宽/mm	1 200
切割深度/mm	0~40
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.2~0.4

由图 25a 可知,宽幅垄面横向起伏不平,由于一体式带刀始终保持直线,导致割刀部分入土的同时,另一部分未入土,未入土部分将无法切根。若增加

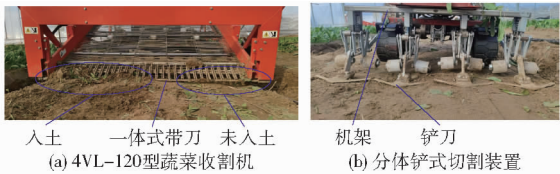


图 25 切割部件作业效果对比
Fig. 25 Comparison of operation effect of cutting parts

一体式带刀入土深度,使其完全入土,易导致壅土过多,污染菠菜。由图 25b 可知,在相同垄面条件下,4 组铲式切割部件均可按照垄面横向走势独立调节铲刀高度,确保各组铲刀入土深度一致,克服了一体式带刀无法适应垄面横向起伏的弊端。

对比图 26a 与图 27a、图 26b 与图 27b 可知,4VL-120 型蔬菜收获机留根变异系数为 48.5%~95.8%, η_1 为 82.7%、72.9%,表明一体式带刀作业效果受垄面横、纵向起伏影响较大,作业性能不理想。由图 27 可知,分体铲式切割装置留根变异系数均低于 25%,较一体式带刀平均降低约 63.42 个百分点;分体铲式切割装置 η_1 为 95.2%,较一体式带刀平均提高约 17.4 个百分点,说明分体铲式切割装置既保证高切根合格率,又使菠菜留根整齐,相比一体式带刀采收装备,克服了垄面土壤条件对作业效果的影响,具有明显设计优势与较高的作业适应性。

4 结论

(1)设计了一种分体铲式入土仿形切割装置。

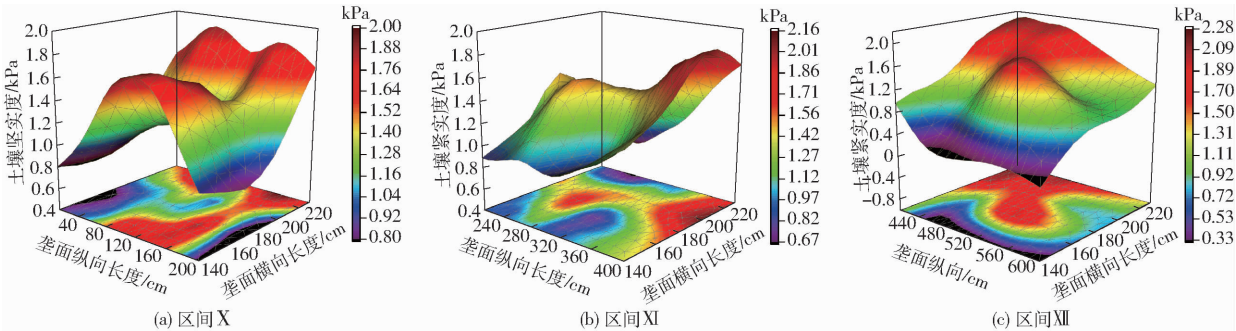


图 26 对比试验作业垄面土壤紧实度统计结果
Fig. 26 Statistical results of soil solidity on operating ridges of comparative test

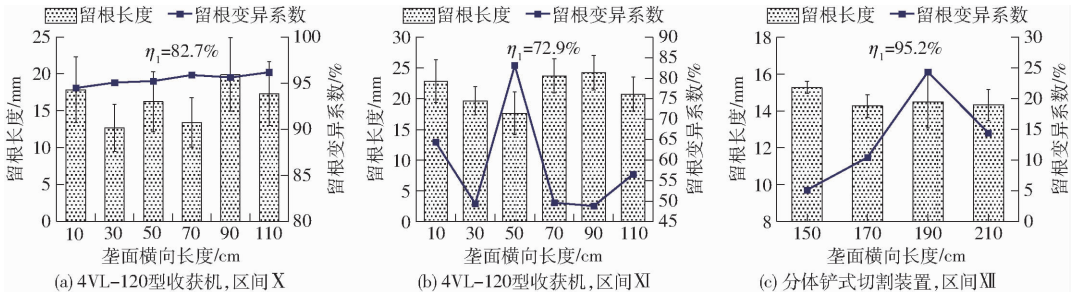


图 27 对比试验结果
Fig. 27 Results of comparative test

通过运动分析确定了铲刀微弧形的运动方式。利用受力分析与离散元仿真分析,得到了铲刀主要结构参数。根据铲刀运动要求,提出一种曲柄连杆-平行四杆组合式传动机构,通过机构-土壤互作受力分析,确定了仿形机构整体结构与压缩弹簧结构参数。

(2)利用复数矢量法构建了传动机构数学模型,以压簧处于中间变形量为例,说明了铲刀切割轨迹优化分析与计算过程,通过数值拟合方法得到了当铲刀达到最优切割轨迹时,速比系数 ρ 与点 D 纵坐标 z_D 的函数关系: $\rho = 0.017\ 3z_D^2 + 0.772\ 6z_D + 13.391\ 2$ 。

(3)通过对比不同前进速度下切口状态与作业效果,验证了铲刀切割轨迹优化结果的准确性。基

于最优切割轨迹,以切根合格率为评价指标得到切割装置最佳作业参数组合: ω_1 为 $18.85\ \text{rad/s}$, ρ 为 $7.92\ \text{mm/rad}$,此时分体铲式切割装置平均切根合格率为 95.23% 。

(4)统计作业垄面土壤紧实度,以留根变异系数为评价指标开展仿形机构作业性能验证试验,结果显示,最优作业参数组合下,留根长度多保持在 $11\ \text{mm} \pm 3\ \text{mm}$ 范围内,平均留根变异系数为 37.96% 。对比一体带刀式采收装备与分体铲式切割装置作业效果,分体铲式切割装置留根变异系数较一体式带刀平均降低约 63.42 个百分点,切根合格率较一体式带刀平均提高约 17.4 个百分点,表明分体铲式切割装置可降低垄面土壤条件对作业效果的影响,具有较高的作业适应性。

参 考 文 献

[1] 邹亮亮. 菠菜带根有序低损收获关键技术研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
ZOU Liangliang. Research on the key technologies of low damage and orderly harvest for spinach with root[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[2] 李光晨. 园艺学概论[M]. 北京:中央广播电视大学出版社,2001.

[3] XU C, MOU B. Responses of spinach to salinity and nutrient deficiency in growth, physiology, and nutritional value[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2016, 141(1): 12–21.

[4] 邹亮亮,刘雪美,苑进,等. 叶菜机械化收获技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报,2022,43(6):15–23.
ZOU Liangliang, LIU Xuemei, YUAN Jin, et al. Research progress in mechanized harvesting technology and equipment of leafy vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 15–23. (in Chinese)

[5] YIN H, WANG Z. Research on the design of cutting table mechanism of leafy vegetable harvester based on computer technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1915(2): 022004.

[6] CHEN W, HU L, WANG G, et al. Design of 4UM–120D electric leafy vegetable harvester cutter height off the ground automatic control system based on incremental PID[J]. Agriculture, 2023, 13(4): 905.

[7] 高峰. 叶菜收获机关键部件的设计及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
GAO Feng. Design and experimental study on key components of leaf vegetable harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[8] 苑进,李金光,邹亮亮,等. 基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):85–98.
YUAN Jin, LI Jinguang, ZOU Liangliang, et al. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 85–98. (in Chinese)

[9] 刘宇. 绿叶菜有序收获机的设计与试验[D]. 杭州:浙江农林大学,2024.
LIU Yu. Design and experiment of an orderly harvesting machine for green leafy vegetables[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2024. (in Chinese)

[10] 胡敏. 菠菜整株机械收获试验台设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2016.
HU Min. Design and experimental study of test bench of spinach mechanical harvesting[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[11] FUJISAWA A, CHIDA Y, NAKAMURA Y, et al. Motion analysis of the root-cutting blade for an automatic spinach harvester [C]//12th International Conference on Motion and Vibration Control, MOVIC 2014, 2014.

[12] FUJISAWA A, CHIDA Y, IIZUKA K. Behavior analysis of soil by motion of a root-cutting blade in soil for an automatic spinach harvester[J]. Transactions of the JSME, 2015, 81(832):15–00298.

[13] TAKAYAMA N, YAMAGUCHI T, FUJISAWA A, et al. Improved path planning of the blade for an automatic spinach harvester[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 15816–15823.

[14] 国家质量监督检验检疫总局. 菠菜生产技术规范:GB/Z 26573—2011[S]. 北京:质检出版社,2011.

[15] 张春楠,陈海丽,崔彦玲,等. 菠菜品质育种研究进展[J]. 中国蔬菜,2024(8):28–36.
ZHANG Chunnan, CHEN Haili, CUI Yanling, et al. Research progress on spinach quality breeding[J]. China Vegetables, 2024(8):28–36. (in Chinese)

[18] 张翠勋,李晓光,杨锋苓,等.半圆管挡板搅拌槽内的固液悬浮[J].有色金属(冶炼部分),2023(6):87-94.
ZHANG Cuixun, LI Xiaoguang, YANG Fengling, et al. Solid-liquid suspension in semi-circular-tubular baffled stirred tank[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(6): 87-94. (in Chinese)

[19] ARMENANTE P M, NAGAMINE E, SUSANTO J. Determination of correlation to predict the minimum agitation speed for complete solid suspension in agitated vessels[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1998, 76(3): 413-419.

[20] 石鑫,杨豫新,牛长河,等.基于 Fluent 分析的棉田废地膜秸秆分离装置设计[J].江苏农业学报,2023,39(4):1062-1071.
SHI Xin, YANG Yuxin, NIU Changhe, et al. Design of separation device for waste film and straw in cotton field based on Fluent analysis[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(4): 1062-1071. (in Chinese)

[21] 陈正寿,黄璐云,杜炳鑫,等.超高压水射流喷头水动力特性研究[J].爆炸与冲击,2022,42(5):158-171.
CHEN Zhengshou, HUANG Luyun, DU Bingxin, et al. Insight of hydrodynamic characteristics related to ultra-high pressure water jet rust removal sprayers[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(5): 158-171. (in Chinese)

[22] 王新坤,薛子龙,徐胜荣,等.双喷嘴负压反馈射流喷头水力性能研究[J].农业机械学报,2019,50(11):278-284.
WANG Xinkun, XUE Zilong, XU Shengrong, et al. Hydraulic performance of negative pressure feedback jet sprinkler with double nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 278-284. (in Chinese)

[23] DONG W Q, YAO L G, LUO W L. Numerical simulation of flow field of submerged angular cavitation nozzle[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 613.

[24] 时凤霞,赵健,孙晓光,等.气液两相射流表面清洗流场数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):960-970.
SHI Fengxia, ZHAO Jian, SUN Xiaoguang, et al. Numerical simulation of surface cleaning flow field for gas-liquid two-phase jet[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 960-970. (in Chinese)

[25] 占凯,张思,唐伟,等.气液两相射流破岩流场数值模拟[J].科学技术与工程,2022,22(23):10034-10041.
ZHAN Kai, ZHANG Si, TANG Wei, et al. Numerical simulation of rock breaking flow field by gas-liquid two-phase jet[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10034-10041. (in Chinese)

(上接第 140 页)

[16] 权龙哲,佟金,曾百功,等.玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J].农业工程学报,2011,27(12):13-17.
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 13-17. (in Chinese)

[17] 黄新平,徐瑞华,黄广杰,等.铲筛组合式生姜收获机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):309-318.
HUANG Xinping, XU Ruihua, HUANG Guangjie, et al. Design and experiment of combined shovel-screen ginger harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 309-318. (in Chinese)

[18] 薛向磊,郑航,叶云翔,等.定刀滑切式榨菜收获机设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(6):48-55.
XUE Xianglei, ZHENG Hang, YE Yunxiang, et al. Design and test of a fixed knife sliding cutting mustard harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 48-55. (in Chinese)

[19] 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,2007:914.

[20] 庞声海.关于滑切理论与滑切角的选用[J].华中农学院学报,1982(2):64-69.

[21] 王小波.基于离散元法仿生深松铲的设计与试验研究[D].成都:四川农业大学,2023.
WANG Xiaobo. Design and experimental study of biomimetic deep loose shovel based on discrete element method[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[22] 赵淑红,赵国鹏,冷明新,等.与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(4):151-162.
ZHAO Shuhong, ZHAO Guopeng, LENG Mingxin, et al. Design and testing of serrated stubble-breaking blade with interactiontype with subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 151-162. (in Chinese)

[23] 彭海涛.叶菜有序收获机割台仿形系统研究[D].镇江:江苏大学,2021.
PENG Haitao. Research on header profile system of orderly harvester for leafy vegetables[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[24] 史宇亮,陈新予,陈明东,等.甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):16-25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16-25. (in Chinese)

[25] 高健,张晓苏,陈新予.基于 EDEM 的甘薯起垄整形机镇压整形装置设计与试验[J].农业工程,2024,14(11):95-99.
GAO Jian, ZHANG Xiaosu, CHEN Xinyu. Design and experiment of sweet potato ridge shaping machine suppression and shaping device based on EDEM[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(11): 95-99. (in Chinese)