doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.035

土下切根聚拢式菠菜有序收获机设计与试验

杨　鑫[1]　张银平[1,2]　贡　亮[2]　周　华[1]　彭　旭[1]　王家胜[3]

（1.山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255049；2.上海交通大学机械与动力工程学院，上海 200240；
3.青岛农业大学机电工程学院，青岛 266109）

摘要：针对现有菠菜收获机作业时存在的有序性差、茎叶损伤大等问题，设计了一种土下切根聚拢式菠菜有序收获机，可将 4 行菠菜土下切根后聚拢为 2 行横向有序收集，缩小横向收集尺寸。对根切铲机构和夹持输送装置进行了设计与分析，对夹持切割瞬时和聚拢输送过程中植株姿态变化进行了理论分析，获得了影响菠菜植株姿态变化以及不发生掉落和不产生茎秆损伤的关键参数。运用 Box－Behnken 试验设计方法进行了台架试验，以机器前进速度、夹持轨道倾角、夹持带输送速度为因素进行三因素三水平正交试验，建立以收获损失率和菠菜伤茎率为响应指标的二次回归模型。通过响应曲面法分析各因素对响应指标的影响，验证试验结果表明：机器前进速度为 1.1 km/h，夹持轨道倾角为 18°，夹持带输送速度为 0.45 m/s 时，收获损失率为 2.47%，伤茎率为 3.05%，各项性能满足菠菜机械化收获要求。

关键词：菠菜收获机；有序收获；聚拢输送

中图分类号：S225　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0384-10　　**OSID**：

Design and Experiment of Spinach Harvester with Root Cutting and Gathering under Soil

YANG Xin[1]　ZHANG Yinping[1,2]　GONG Liang[2]　ZHOU Hua[1]　PENG Xu[1]　WANG Jiasheng[3]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*
2. *School of Mechanical and Power Engineering*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: Spinach, as a typical stem and leaf vegetable, has relatively high economic and nutritional value. To solve the problems such as poor orderliness and large damage to stems and leaves existing in the mechanical harvesting operation of spinach, a spinach ordered harvester with root cutting and gathering under the soil was designed. The collection scheme of cutting the roots of four rows of spinach under the soil and gathering them into two rows for orderly conveying was adopted, reducing the size of the lateral collection frame. It can achieve the operation process of "clamping into the soil and cutting roots－orderly conveying-gathering and collecting－turning and spreading" at one time. The root cutting shovel mechanism and the clamping, conveying, gathering and collection device were designed and analyzed. The key parameters of the triangular root cutting shovel and the clamping gap of the clamping belt that prevented spinach from dropping and stem damage during clamping and conveying were determined. A theoretical analysis was conducted on the changes in plant posture during the instantaneous working process of clamping and cutting, and the main factors influencing the posture changes of spinach plants were obtained. A bench test was conducted by using the Box－Behnken experimental design method. A three-factor and three-level orthogonal test was carried out with the machine's forward speed, the inclination angle of the clamping track, and the conveying speed of the clamping belt as factors, and a quadratic regression model was established with the harvest loss rate and the spinach stem injury rate as response indicators. The influence of each factor on the response index was analyzed by the response surface method. The verification test results showed that when the machine's forward speed was 1.1 km/h,

收稿日期：2025－01－21　修回日期：2025－02－23

基金项目：上海市东方英才配套支持项目(沪农科 T2024101)和山东省重点研发计划项目(2022CXGC010611)

作者简介：杨鑫(2000—)，男，硕士生，主要从事设施农业装备研究，E-mail：yangxin0411tt@163.com

通信作者：张银平(1989—)，女，副教授，博士，主要从事智能农机装备研究，E-mail：zhangyinping929@163.com

the inclination angle of the clamping track was 18°, and the conveying speed of the clamping belt was 0.45 m/s, the harvest loss rate was 2.47%, the stem damage rate was 3.05%, and all performances met the requirements of mechanized spinach harvesting.

Key words: spinach harvester; orderly harvest; gathering and conveying

0　引言

菠菜作为典型的绿叶类蔬菜，富含多种人体所需营养元素[1-3]，但因其茎叶表面柔软、易损伤等特点导致机械化采收难度大，多以人工采收为主，劳动强度大、效率低且成本高[4-6]。因此，菠菜机械化采收是绿叶类蔬菜生产进程中亟需解决的问题。

目前，发达国家针对绿叶类蔬菜收获机进行了大量研究并取得了一定进展。欧美国家以大型自走式收获机为主[7-9]，如意大利 Hortech 公司研制的 SLIDE ECO 型自走式电动叶菜收获机，采用可升降式立向夹持输送收获方式，输送后叶菜直接落筐或连接打捆装置由人工扶持打捆，机型大，收获效率高。日韩等国家主要以电驱小型收获机为主，代表机型有 Postoa 公司研发的电动韭菜收获机和 Nishizawa 公司研制的电动叶菜收获机，采用扭转输送实现叶菜横向收集，输送后蔬菜靠重力掉落在收集筐内。国内对于绿叶类蔬菜机械化收获的研究起步较晚，但取得了较多研究成果。现有叶菜收获机虽在设计中提出了多样化的切割、夹持与输送方案，如往复式切割刀、锯式切割刀、柔性夹持、立向或倾斜输送等，但普遍存在对作物适应性不足（叶片易损、茎秆易折断）、多行收获时输送方式单一、整体输送路线流畅性欠佳等共性问题。尤其在转向、扭转、收集环节缺乏柔性作业机制，一般采用抛送或叶菜自然落筐的方式，导致收集筐中叶菜有序性降低，影响叶菜采收整体效果与收获品质[10-20]。

目前国内适用于茎叶类蔬菜收获的机械仍以无序收获为主，对一些有序性要求较高的特定绿叶菜不适用。切割装置采用往复式横向切割器和圆盘切割器，多为留茬切割或贴地切根，苑进等[21]设计的单行菠菜收获机，虽然能实现入土切根，但根切铲固定，切割阻力相对较大；同时现有叶菜有序收获机的输送装置多采用立向直接输送或扭转输送，叶菜自然落筐，成筐效果不稳定，多行收获作业时一行对应一个收集筐，机器横向结构尺寸随之增大，不适合设施小地块使用。

本文基于曲柄连杆机构设计纵向往复式振动切根装置，实现菠菜入土切根收获，土下切割阻力小；基于三角聚拢和扭转倒向原理设计菠菜“立向-聚拢-横向”三级有序输送收集装置，实现叶菜收获后横向铺放的预成捆状态，相比直接落筐收集方式有序性更好，三角聚拢输送将 4 行菠菜聚拢为 2 行，减小横向收集辊架结构尺寸，使整机结构更紧凑。对关键部件进行设计，通过理论分析确定主要结构和作业参数，结合台架试验验证夹持输送聚拢收集装置作业可靠性，为菠菜等绿叶类蔬菜有序收获装备研究提供参考。

1　整机结构和工作原理

1.1　整机结构

土下切根聚拢式菠菜有序收获机可实现菠菜带根收获，将 4 行菠菜聚拢为 2 行输送并横向铺放。其主要结构包括：机架、驱动行走系统、切根装置、夹持输送装置以及控制系统等，其中驱动行走系统为电机驱动的两个橡胶轮；切根装置为曲柄连杆机构驱动的纵向往复式根切铲，根切铲结构为对称三角形，单个根切铲可完成双行菠菜切割，切割过程为滑切。夹持输送装置由立向输送、聚拢输送和转向输送 3 部分组成，各部分均为柔性输送带，其中聚拢输送利用三角聚拢机构将双行菠菜聚拢为单行输送，缩小了横向铺放尺寸。整机结构如图 1 所示。

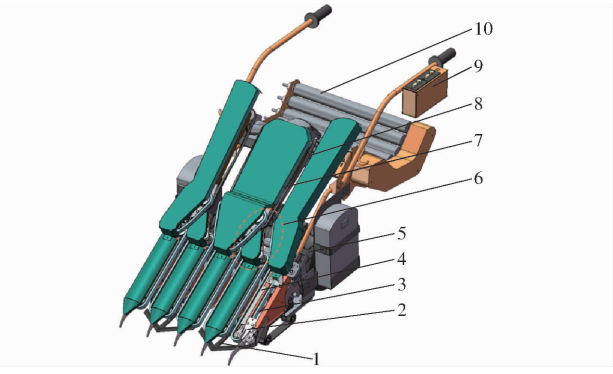


图 1　菠菜有序收获机整机结构图

Fig. 1　Structure of spinach orderly harvesting machine

1. 切根装置　2. 分禾机构　3. 夹持输送带　4. 立向输送装置　5. 驱动系统　6. 聚拢输送装置　7. 机架　8. 转向输送机构　9. 控制系统　10. 收集辊架

1.2　工作原理与主要技术参数

菠菜收获过程分为 5 个阶段：夹持切割阶段、立向输送阶段、聚拢输送阶段、转向输送阶段和横向收集阶段。随着收获机向前行驶，菠菜植株在分禾机构的作用下有序喂入到立向夹持输送通道中，被立向夹持输送带夹持住的同时被底部切入土壤的切根

装置从根部切断。切断后的菠菜植株由立向夹持输送装置持续向后输送,到达聚拢装置后两行菠菜聚拢为一行,并进入转向输送机构通道中。转向输送机构采用柔性扭转输送带,从夹持面自前向后依次扭转,中间低两侧高,输送过程中将菠菜植株逐渐由立向输送状态转为“根朝外,叶向里”的横向输送状态,在辊筒的向后运动作用下铺放于横向收集辊筒上,其工作过程如图 2 所示。整机参数如表 1 所示。

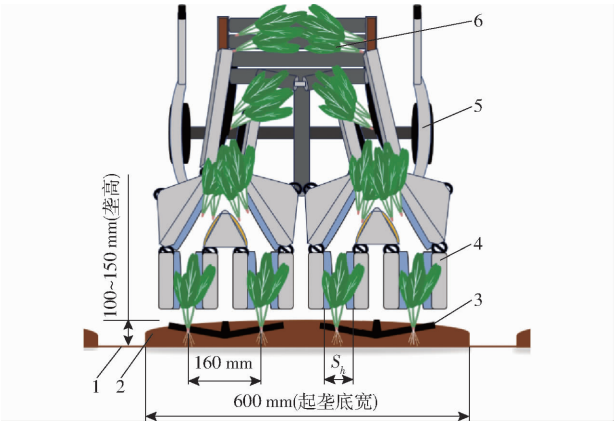


图 2 菠菜有序聚拢收获工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of orderly gathering and harvesting spinach

1. 垄沟 2. 垄堆 3. 滑切割刀 4. 夹持轨道 5. 机架 6. 菠菜植株

表 1 收获机主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of combine harvester

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 800×1 200×830
电机额定功率/kW	0.85
作业幅宽/m	0.8
轮距/mm	800
收获行数	4
收获行距/mm	150~200
作业速度/(km·h^{-1})	≤1.2
生产效率/(m^2·h^{-1})	≤1 000

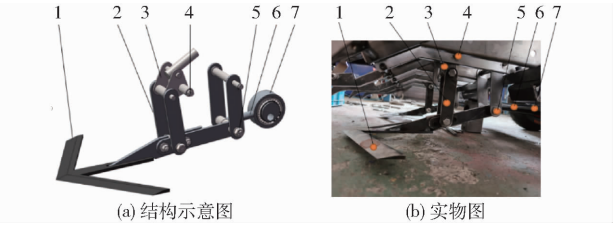
2 关键部件设计

2.1 纵向往复式切根装置

切根装置是菠菜有序收获机的核心工作部件,位于整个收获机前部下方,主要由曲柄连杆机构和三角根切铲组成,如图 3 所示。其位于立向输送装置下方,通过固定轴安装于机架上。工作时,曲柄连杆机构的两固定轴只作回转无前后位移,支撑架下端活动轴外套与偏心轮连接杆固定,偏心轮运动时将连接杆不断前后推动,通过连接杆带动三角根切铲。

2.1.1 切根装置结构参数设计

三角根切铲入土切根,要有较好的耐磨性和强



(a) 结构示意图 (b) 实物图

图 3 切根装置

Fig. 3 Root cutting device

1. 三角根切铲 2. 支撑架 3. 调节机构 4. 固定轴 5. 活动轴 6. 连接杆 7. 偏心轮

度,其材料选用耐磨性较好的高速钢[22],设计厚度 d 为 5 mm,刃口斜角 γ_0 为 17°。根据菠菜种植模式设计根切铲结构参数,如图 4 所示。菠菜种植行距一般为 160~250 mm,单个根切铲要完成两行菠菜切割,其整体宽度要大于 250 mm。当根切铲宽度一定时,切割角 γ_1 是影响切割阻力的重要因素,切割角越大,切割阻力越小[23],但切割角太大会使切割刃长度 L_0 过大,考虑前后尺寸和根切铲整体宽度要求,设计单侧切割刃长度 L_0 为 170 mm,切割角 γ_1 为 35°,计算根切铲整体宽度 L_1 为 278.5 mm,满足双行菠菜收割要求。根切铲的入土深度和入土角度可以通过调节安装角实现。

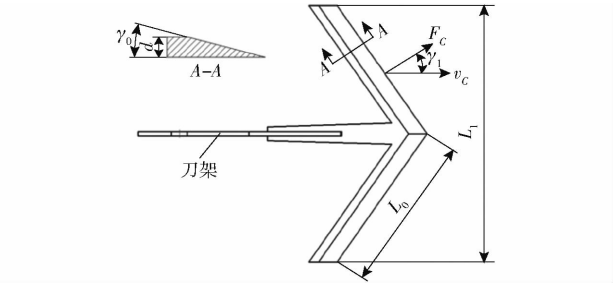


图 4 三角根切铲结构图

Fig. 4 Structural diagram of triangular root cutting shovel

2.1.2 切根装置运动分析

根切铲由曲柄连杆机构驱动,为确定其切割速度和切割力对菠菜根茎切割的影响,对切根装置运动过程进行分析,如图 5 所示,A、B 两固定铰链作为机架,铰链 A 处设有高度调节机构,摇杆 BC 固定在偏心轮的连杆上。

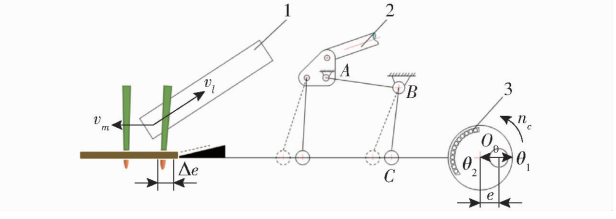


图 5 根切铲机构运动过程分析

Fig. 5 Motion process analysis of root cutting shovel mechanism

1. 夹持输送带 2. 高度调节杆 3. 轴承

基于曲柄连杆机构的运动特性，根切铲的工作行程与偏心距有关，即

$$S = e(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \tag{1}$$

式中　S——根切铲工作行程，mm

e——偏心距，mm

θ_1——偏心轮工作时段的起始角度，(°)

θ_2——偏心轮工作时段的终止角度，(°)

由式(1)可知，当偏心轮由一侧极限位置运动到另一侧极限位置时有：$S = 2e$，则偏心轮转动一圈即根切铲完成一次完整的切割过程。增加偏心距，根切铲行程增加，偏心轮速度不变的情况下，根切铲的运动速度增大，切割力增加，有利于切割。但偏心距过大，不仅部件尺寸增加，工作振动和噪声也会增大，影响使用寿命，因此偏心距不宜过大。测定菠菜最大主根直径 d_0 为 7.58 mm，考虑部件尺寸及切割要求，设计偏心距为 $1.1d_0$。

菠菜收获时，立向夹持输送带将菠菜植株夹持的同时根切铲将菠菜从根部切断，根切铲切割速度大于立向夹持输送速度，菠菜植株才能被顺利切割并向后输送，否则菠菜植株未完成切割即被立向夹持输送带拔断[24-25]。则有

$$2\pi r n_c > n_l \pi d_l \cos\beta \tag{2}$$

式中　n_c——偏心轮转速，r/min

n_l——立向夹持输送主动辊转速，r/min

r——偏心轮半径，mm

d_l——立向夹持输送主动辊直径，mm

β——夹持输送轨道与水平面夹角

通过式(2)可初步计算出根切铲偏心轮转速 n_c 大于 257 r/min 时能够达到切割条件，根切铲在满足菠菜顺利切割的基础上，还需满足低损伤夹持输送要求，因此参考文献[14,26]，确定偏心轮转速为 360 r/min。

2.2　夹持输送装置

2.2.1　立向夹持输送组件设计

立向输送组件有 5 组柔性夹持输送机构，形成 4 条立向夹持输送通道，每组机构主要由分禾机构、主动辊、从动辊和夹持带组成，结构如图 6 所示。其中分禾机构安装于立向夹持输送机构前端，收获时将相邻两行菠菜交错的茎叶分开。输送机构下端为从动辊，上端为主动辊，由调速电机通过齿轮箱驱动。

机器前进速度、夹持输送带速度和倾角、割刀安装位置等对菠菜植株的喂入、切割和输送效果均产生影响[27]，在夹持状态下进行切割是保证植株能够有序输送的必要条件[28]，对植株夹持切割过程进行理论分析。当植株被夹持切割后，受夹持输送带拔

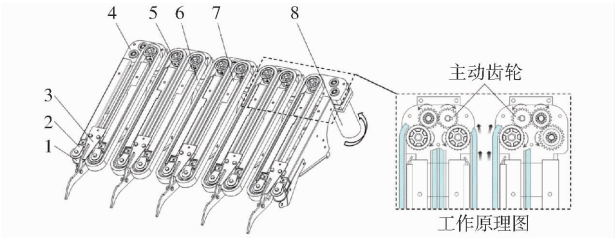


图 6　立向夹持输送装置结构图

Fig. 6　Structure diagram of vertical gripper conveying device

1. 从动辊　2. 从动辊安装架　3. 分禾机构　4. 齿轮传动盒　5. 主动辊　6. 夹持输送带　7. 夹持带安装架　8. 夹持带驱动电机

取效果和机具前进作用，菠菜植株会出现前倾或后倾等不确定姿态。夹持输送带的绝对速度 v 为机器前进速度 v_m 与输送带倾斜向上运动速度 v_l 的合成，如图 7 所示。

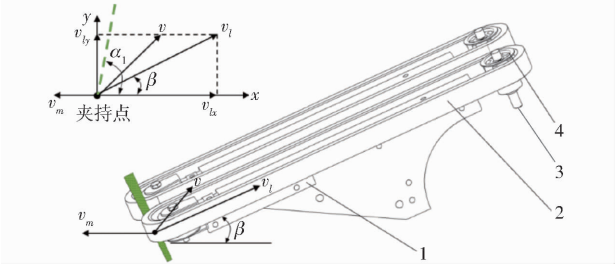


图 7　菠菜茎秆夹持输送过程速度分析

Fig. 7　Velocity analysis of spinach stem gripping transport process

1. 弹簧架　2. 夹持输送带　3. 主动辊传动轴　4. 主动辊

由于植株根部固定在土壤中，被输送带夹持后菠菜植株茎叶向后倾斜，与地面形成夹角 α_1，根据图 7 所示几何关系，可知夹持时植株姿态角 α_1 为

$$\alpha_1 = \arctan\frac{v_{ly}}{v_m - v_{lx}} \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} v_{lx} = v_l\cos\beta \\ v_{ly} = v_l\sin\beta \end{cases} \tag{4}$$

式中　v_{lx}——夹持点植株水平方向分速度，m/s

v_{ly}——夹持点植株竖直方向分速度，m/s

输送带线速度为

$$v_l = n_l\pi d_l/60 \tag{5}$$

夹持输送带的绝对速度 v 向后才能保证菠菜顺畅向后输送不推倒菠菜植株，即夹持输送带在植株夹持点水平方向的分速度大于收获机前进速度

$$v_l\cos\beta \geqslant v_{m\max} \tag{6}$$

式中　$v_{m\max}$——收获机最大前进速度，设计为 0.33 m/s

但夹持输送带太快，菠菜植株还来不及被切割就被向后夹持输送，菠菜植株会被连根拔起或茎叶处被拔断。

为保证菠菜植株顺利切割并在稳定状态下被夹持输送，对夹持切割过程中菠菜植株在机具前进方

向上的姿态变化进行分析。如图 8 所示，假设夹持输送带静止不动，菠菜植株相对夹持输送带以 v_m 运动，到达点 C 时被切割，以初始夹持阶段菠菜植株根部与地面水平线的交点 O 为坐标原点建立直角坐标系，夹持点 F 离地高度为 H_0，菠菜植株切根深度为 h_0，切割时植株与地面的夹角为 α_2，菠菜植株从开始夹持到被切断所用时间为 t。

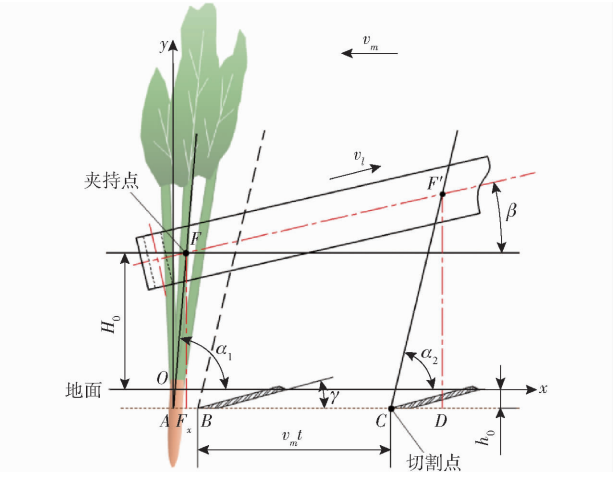


图 8 夹持滑切过程菠菜植株姿态变化分析

Fig. 8 Analysis of postural changes of spinach plants during clamping and sliding cutting

根据输送带速度与机具前进速度关系，夹持切割阶段点 F' 相对于夹持阶段点 F 的位移方程为

$$\begin{cases} x_{F'} = v_l t\cos\beta \\ y_{F'} = v_l t\sin\beta \end{cases} \tag{7}$$

夹持点 F 在水平面的投影距离为

$$L_{AF_x} = (H_0 + h_0)\cot\alpha_1 \tag{8}$$

夹持输送带在点 F 夹持菠菜茎秆，为保证先夹持再切割，确定割刀安装位置，需满足

$$L_{AB} \geqslant L_{AF_x} \tag{9}$$

在 $\triangle CDF'$ 中，结合式(7)得

$$\tan\alpha_2 = \frac{v_l t\sin\beta + H_0 + h_0}{v_l t\cos\beta - L_{F_xB} - v_m t} \tag{10}$$

综合式(7)～(10)可知，夹持切割后菠菜植株的姿态变化与 α_2 相关，当 α_2 越接近于 $\pi/2$，夹持输送状态越理想。夹持点高度通过夹持轨道安装高度与倾角确定，影响 α_2 的主要参数为机具前进速度 v_m、夹持输送带线速度 v_l、夹持轨道倾角 β。由式(10)可知 β 越小，α_2 越小，即夹持输送带相对植株茎秆的夹持位置越倾斜，夹持越不稳定，且茎叶损伤可能性越大，若 β 过小，则整机高度太低。考虑整机结构尺寸和夹持特性 β 取 10°～20°[29]。

2.2.2 聚拢输送组件设计

在输送过程中聚拢处的植株最容易掉落，其夹持间隙对菠菜植株的聚拢输送效果有重要影响。如图 9 所示，聚拢装置主要由聚拢安装架、三角装置和夹持带等组成，聚拢过程通过左、右两侧夹持并配合中间三角装置实现，三角装置下方安装有大小槽轮，顶端为 2 个独立同心小槽轮，槽轮上安装有花纹弹性胶绳，使三角两侧夹持聚拢时均同时向上输送。设 S_h 为单行输送夹持间隙，S_H 为聚拢后输送夹持间隙。

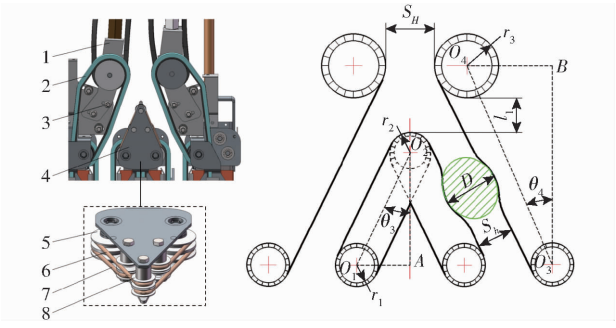


图 9 聚拢装置关键参数设计分析

Fig. 9 Design of key parameters of gathering device

1. 聚拢安装架 2. 夹持输送带 3. 调节螺栓 4. 三角装置 5. 大槽轮 6. 长胶绳 7. 短胶绳 8. 小槽轮

菠菜植株在聚拢输送过程中被无损夹持且不发生掉落，需满足

$$F = \mu N \tag{11}$$

式中 F——菠菜发生茎秆破损的正向力夹持力，物理特性压缩试验值为 20.32 N

μ——夹持带摩擦因数，一般取 0.5

N——夹持带对菠菜植株施加的最小力，夹持试验值为 16.16 N

由于力的相对作用，当夹持带对菠菜植株施加正向夹持力时，植株会产生反向力使夹持带发生形变[30]。夹持间隙 S_h 应满足

$$F = kx = k(D - S_h) \tag{12}$$

式中 k——弹性常数，取 1.03 N/m²

x——夹持带发生形变时产生的位移

D——植株茎叶平均直径，测得 25 mm

由式(12)得菠菜植株单行输送临界夹持间隙为 5.27 mm，即当单行输送夹持间隙 $S_h \leqslant 5.27$ mm 时，菠菜茎秆将产生损伤。将式(11)代入式(12)得单行输送最大夹持间隙为 17.15 mm，即当 $S_h \geqslant 17.15$ mm 时，菠菜将发生掉落。根据试验菠菜品种平均植株，本设计 S_h 取 11 mm，聚拢后输送夹持间隙 S_H 取 20 mm，且聚拢处夹持间隙可通过聚拢安装架上的键形孔螺栓紧固件调节，调节范围 10 mm。

在聚拢输送过程中，三角装置顶部与转向机构汇入处会形成一个间隙 l_1，为保证菠菜聚拢后不会因为间隙太大而发生掉落，需确定间隙 l_1，计算式为

$$l_1 = l_{O_3O_4}\cos\theta_4 - r_3 - r_2 - l_{O_1O_2}\cos\theta_3 \tag{13}$$

式中　l_1——聚拢处掉落临界间隙

θ_3——三角装置顶槽轮中垂线与安装中心线 O_1O_2 的夹角，(°)

θ_4——主动辊 O_3 垂线与安装中心线 O_3O_4 的夹角，(°)

$l_{O_1O_2}$——点 O_1、O_2 间长度

$l_{O_3O_4}$——点 O_3、O_4 间长度

r_3——小槽轮半径　　r_2——主动辊半径

聚拢后两株菠菜理论直径为 50 mm，考虑菠菜植株茎叶交叉、输送惯性等因素，间隙小于 50 mm 即不产生掉落，由此确定聚拢输送带的长度和安装位置。

2.2.3　转向输送组件设计

转向输送机构是实现菠菜连续有序收获的关键部分，4 行菠菜经过聚拢装置后聚拢为 2 行进入转向输送机构，两组转向输送机构对称安装，两侧高中间低，转向后的 2 行菠菜以“根朝外，叶向里”状态进入收集辊架上，靠前 2 组辊筒为倾斜安装，收集辊架通过电机驱动向后转动，将菠菜横向有序铺放。如图 10 所示，图中 F_1、F_2 为扭转带夹持力，N。

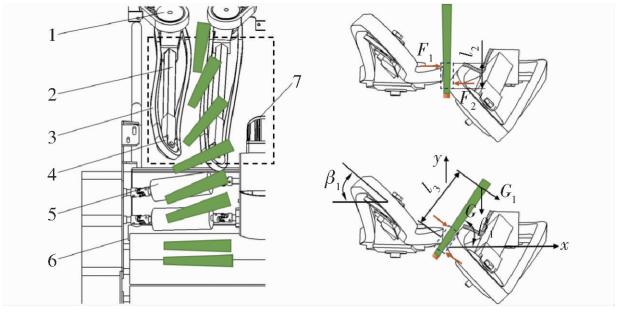


图 10　单侧转向输送过程分析

Fig. 10　Analysis of unilateral steering process

1. 转向输送驱动辊　2. 转向输送安装架　3. 扭转带　4. 张紧轮　5. 倾斜辊筒　6. 机架　7. 辊筒电机

对菠菜植株转向输送过程进行分析，菠菜植株在直立状态被夹持，受夹持输送带扭转产生的扭转力产生转向倾斜，植株与水平面夹角 β_1 越小，植株输送倾斜角度越大，但也对输送带扭转角度要求较高，本研究设计输送带长为 1 125 mm，扭转角度为 45°。此时 β_1 计算式为

$$\beta_1 = \arcsin(G/l_3) \tag{14}$$

式中　β_1——植株转向倾斜角，(°)

G——菠菜植株重力，N

l_3——夹持点到菠菜重心的距离，mm

植株转向倾斜时不仅与扭转瞬时扭转带夹持力有关，还与转向倾斜力矩有关。转向输送过程中，主要依靠输送带夹持力稳定夹持住植株进行自下而上的缓慢转向过程，当转向输送至末端时，植株倾斜角 β_1 达到最小值，此时植株所受夹持力减小，在倾斜力矩作用下被铺放至收集辊架上，完成转向输送铺放过程。

3　台架试验

3.1　试验条件及评价指标

3.1.1　试验条件

2024 年 7 月在山东理工大学农业工程与食品科学学院实验室进行台架试验，试验台架如图 11 所示。试验菠菜品种为洪兰菠菜，试验时测得菠菜整株平均高度为 380 mm，植株包裹平均直径为 25 mm，平均茎高为 270 mm，主根平均直径为 6.48 mm。

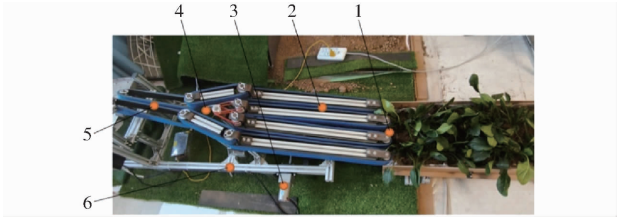


图 11　试验台架

Fig. 11　Test bench

1. 滑切割刀　2. 立向输送组件　3. 割刀驱动电机　4. 聚拢组件　5. 转向输送组件　6. 机架

3.1.2　评价指标

参考 NY/T 3664—2020《手扶式茎叶类蔬菜收获机质量评价技术规范》、DG/T 249—2021《叶类蔬菜收割机》农机鉴定大纲，选取菠菜收获损失率 Y_1 和作业伤茎率 Y_2 作为评价指标。

(1)损失率

损失率是衡量收获性能的重要指标。输送过程是持续运动状态，由于叶菜植株大小不同等因素，将产生一定损失。损失率计算公式为

$$Y_1 = \frac{Q_f}{Q_z + Q_f} \times 100\% \tag{15}$$

式中　Q_z——收集到筐内的菠菜植株数

Q_f——收获过程从夹持输送带掉落的菠菜数

(2)伤茎率

伤茎率是衡量收获品质的重要指标。输送时夹持位置、夹持力等会对菠菜茎叶造成一定损伤。伤茎率计算公式为

$$Y_2 = \frac{Q_i}{Q_z} \times 100\% \tag{16}$$

式中　Q_i——茎叶有肉眼可见损伤的菠菜数量

3.2　试验结果与显著性分析

根据前期试验和理论分析，选取影响输送效果的机器前进速度 v_m、夹持轨道倾角 β 和夹持带输送速度 v_l 作为试验因素。试验因素编码值见表 2，试验方案及结果见表 3。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factor codes

编码	前进速度 v_m/(km·h^{-1})	夹持轨道倾角 β/(°)	夹持带输送速度 v_l/(m·s^{-1})
1	1.2	20	0.55
0	1.0	15	0.45
-1	0.8	10	0.35

表 3 试验方案和结果

Tab. 3 Test scheme and result

序号	前进速度 v_m/(km·h^{-1})	夹持轨道倾角 β/(°)	夹持带速度 v_l/(m·s^{-1})	损失率 Y_1/%	伤茎率 Y_2/%
1	0.8	10	0.45	1.734	1.634
2	1.2	10	0.45	2.173	2.843
3	0.8	20	0.45	2.135	1.755
4	1.2	20	0.45	0.629	1.308
5	0.8	15	0.35	0.872	1.311
6	1.2	15	0.35	0.735	1.912
7	0.8	15	0.55	2.102	1.654
8	1.2	15	0.55	0.784	1.035
9	1.0	10	0.35	1.247	2.684
10	1.0	20	0.35	1.021	1.783
11	1.0	10	0.55	2.235	1.697
12	1.0	20	0.55	0.879	2.011
13	1.0	15	0.45	0.873	0.671
14	1.0	15	0.45	0.244	0.322
15	1.0	15	0.45	0.342	0.441
16	1.0	15	0.45	0.453	0.511
17	1.0	15	0.45	0.421	0.363

(1)损失率方差分析

建立损失率 Y_1的二次多项式回归方程

$$Y_1 = 0.47 - 0.32v_m - 0.34\beta + 0.27v_l - 0.49v_m\beta - 0.3v_mv_l - 0.28v_l\beta + 0.49v_m^2 + 0.71\beta^2 + 0.17v_l^2 \quad (17)$$

对损失率进行方差分析,由表 4 可知,损失率回归模型极显著,失拟项为不显著,表明模型与试验结果拟合性好。通过比较 F 值可知,影响损失率的因素由大到小为:夹持轨道倾角 β、前进速度 v_m和夹持带输送速度 v_l。显著性检验表明,前进速度 v_m、夹持带输送速度 v_l和夹持轨道倾角 β 对菠菜损失率均有显著影响,并且作业速度 v_m与夹持轨道倾角 β 交互作用 $v_m\beta$、前进速度二次项 v_m^2 以及夹持轨道倾角二次项 β^2对菠菜损失率也有极显著影响。

(2)伤茎率方差分析

建立伤茎率 Y_2的二次多项式回归方程

$$Y_2 = 0.47 + 0.09v_m - 0.25\beta - 0.16v_l - 0.41v_m\beta - 0.31v_mv_l + 0.3\beta v_l + 0.43v_m^2 + 0.99\beta^2 + 0.59v_l^2 \quad (18)$$

表 4 损失率方差分析

Tab. 4 Variance analysis of loss rate

方差来源	自由度	平方和	均方	F	P
模型	9	7.44	0.826 5	19.36	0.000 4
v_m	1	0.795 1	0.795 1	18.62	0.003 5
β	1	0.928 2	0.928 2	21.74	0.002 3
v_l	1	0.564 5	0.564 5	13.22	0.008 3
$v_m\beta$	1	0.945 8	0.945 8	22.15	0.002 2
v_mv_l	1	0.348 7	0.348 7	8.17	0.024 4
βv_l	1	0.319 2	0.319 2	7.48	0.029 1
v_m^2	1	1.01	1.01	23.63	0.001 8
β^2	1	2.13	2.13	49.96	0.000 2
v_l^2	1	0.117 7	0.117 7	2.76	0.140 8
残差	7	0.298 8	0.042 7		
失拟项	3	0.066 3	0.022 1	0.380 5	0.773 3
误差	4	0.232 5	0.058 1		
总和	16	7.74			

由方差分析(表 5)可知,伤茎率回归模型极显著,失拟项为不显著,表明模型与试验结果拟合性高。通过比较 F 值可知,影响伤茎率的因素由大到小为:夹持轨道倾角 β、夹持带输送速度 v_l、前进速度 v_m。显著性检验结果表明,夹持轨道倾角 β 与前进速度 v_m 交互项以及前进速度 v_m、夹持轨迹倾角 β 和夹持带输送速度 v_l 平方项对伤茎率有极显著影响。

表 5 伤茎率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of stem injury rate

方差来源	自由度	平方和	均方	F	P
模型	9	9.23	1.03	29.45	<0.000 1
v_m	1	0.069 2	0.069 2	1.99	0.201 5
β	1	0.500 5	0.500 5	14.37	0.006 8
v_l	1	0.209	0.209	6	0.044 1
$v_m\beta$	1	0.685 6	0.685 6	19.69	0.003
v_mv_l	1	0.372 1	0.372 1	10.68	0.013 7
βv_l	1	0.369 1	0.369 1	10.6	0.014
v_m^2	1	0.774 3	0.774 3	22.23	0.002 2
β^2	1	4.16	4.16	119.59	<0.000 1
v_l^2	1	1.45	1.45	41.74	0.000 3
残差	7	0.243 8	0.034 8		
失拟项	3	0.167 9	0.056	2.95	0.161 7
误差	4	0.075 9	0.019		
总和	16	9.47			

3.3 因素交互作用效果分析

(1)因素交互作用对损失率的影响

图 12 为因素交互作用对损失率影响的响应曲面,从图中可以看出,当前进速度固定在某一水平时,损失率与夹持带输送速度正相关,与夹持轨道倾角负相关,随着夹持带输送速度增加损失率呈增加趋势,夹持轨道倾角增加,植株姿态与地面倾斜角

α_2随之增大，损失率则呈下降趋势，当夹持带输送速度为 0.45 m/s 左右，夹持轨道倾角为 18°时结果较优。当夹持带输送速度固定在某一水平，随着前进速度的增加，损失率呈先降低后增加的趋势；当夹持轨道倾角一定时，前进速度增加能降低损失率，但当前进速度超过 1.1 km/h 时损失率又呈增加趋势，因为前进速度太快，菠菜喂入量增大，易导致输送通道发生堵塞，增加损失率。

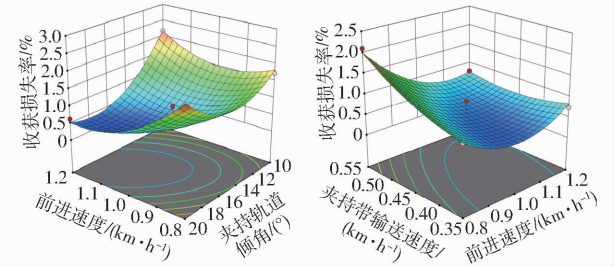


图 12　因素交互作用对菠菜损失率影响的响应面

Fig. 12　Response surfaces of influence of factor interaction on loss rate of spinach

实际工作中，当作业速度和夹持带输送速度取得较优匹配关系时，夹持带输送速度对损失率的影响不如前进速度和夹持轨道倾角对损失率的影响显著。因此，确定收获损失率在夹持轨道倾角为 18°、夹持带输送速度 0.45 m/s 且作业速度为 1.1 km/h 时达到最佳工作状态。

(2)因素交互作用对伤茎率的影响

图 13 为因素交互作用对菠菜伤茎率影响的响应曲面，从图中可以看出，当前进速度和夹持带输送速度固定在某一水平时，伤茎率随着夹持轨道倾角增大呈先降低再增加的趋势，原因是夹持轨道倾角偏小会导致倾斜角 α_2越小，夹持输送带相对植株茎秆的夹持位置越倾斜，夹持越不稳定，夹持轨道倾角过大，会使输送路线提升过快，影响后续聚拢、倾覆转向输送过程，增加伤茎率。当夹持轨道倾角为 18°时伤茎率结果较优，此时增加前进速度，伤茎率增加变缓，因此夹持轨道倾角取得较优值时，适当增加前进速度，能提高收获机收获效率，但当前进速度超过 1.1 km/h 时，菠菜喂入量增加导致伤茎率增加，甚至发生堵塞；前进速度固定时，增加夹持带输送速度，伤茎率逐渐增加，原因是夹持带输送速度未能与前进速度取得较优匹配关系，菠菜喂入时不能完全切割，影响正常拔禾输送，当夹持带输送速度在 0.45 m/s 左右时与作业速度取得较优匹配关系，各机构工作间配合较好，伤茎率最小。因此，确定夹持轨道倾角为 18°、前进速度为 1.1 km/h、夹持带输送速度为 0.45 m/s 时，伤茎率最小。

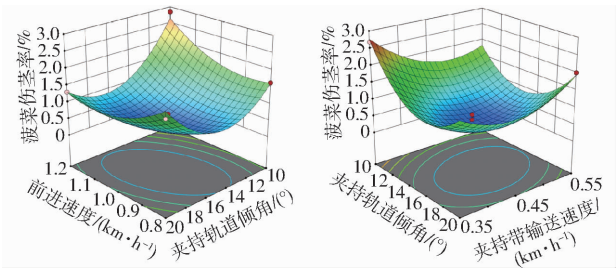


图 13　因素交互作用对菠菜伤茎率影响的响应面

Fig. 13　Response surfaces of influence of factor interaction on stem injury rate of spinach

3.4　模型优化与验证试验

(1)参数优化

菠菜收获机工作参数选择原则是：采收作业后损失率和伤茎率应低于 5%。为得到最佳因素水平，结合各试验因素边界条件，以收获损失率最小、菠菜伤茎率最小为目标，利用 Design-Expert 13 软件对回归模型进行优化。优化结果为：当前进速度为 1.1 km/h、夹持轨道倾角为 18.36°、夹持带输送速度为 0.45 m/s 时，损失率为 2.54%，伤茎率为 2.91%。

(2)验证试验

设置试验台喂入速度为 1.1 km/h、夹持轨道倾角为 18°、夹持带输送速度为 0.45 m/s 进行验证试验。试验收获损失率为 2.47%，菠菜伤茎率为 3.05%，与优化结果误差较小，满足菠菜采收作业要求。

4　结论

(1)针对现有菠菜收获机作业时存在有序性差、茎叶损伤大等问题，结合菠菜种植农艺要求与机械化采收要求，提出“4 变 2”聚拢收集方案，设计了土下切根聚拢式菠菜有序收获机，阐述了收获机整体结构与工作原理，能够一次性完成“夹持切割—有序输送—转向铺放”的作业环节。

(2)通过收获机关键部件结构设计，确定了根切铲机构和夹持输送装置关键参数；对夹持切割时植株姿态变化进行分析并确定影响姿态变化的主要参数为：机具前进速度 v_m、夹持带输送速度 v_l、夹持轨道倾角 β；确定两条输送带之间的夹持间隙为 11 mm，聚拢后输送带的夹持间隙为 20 mm 时，菠菜植株不会发生掉落和茎秆破损。

(3)采用 Box－Behnken 中心组合试验设计开展了菠菜有序收获台架试验，建立以收获损失率和菠菜伤茎率为响应指标的二次回归模型，通过方差分析和响应面分析，得出了机具前进速度、夹持带输送速度和夹持轨道倾角及交互作用对试验评价指标

的影响规律。应用 Design-Expert 13 软件对所选回归模型进行优化,通过试验验证了优化结果的准确性,验证试验结果表明:当机器作业速度为 1.1 km/h,夹持轨道倾角为 18°,夹持带输送速度为 0.45 m/s 时,损失率为 2.47%,伤茎率为 3.05%,满足菠菜收获要求。

参 考 文 献

[1] 刘奇,陈斌,孙松林,等. 叶类蔬菜有序收获夹持输送的力学特性研究[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(4): 116 - 125.
LIU Qi, CHEN Bin, SUN Songlin, et al. Study on mechanical characteristics of clamping transport in orderly harvest of leaf vegetables[J]. China Agricultural Science and Technology Review, 2022, 24(4): 116 - 125. (in Chinese)

[2] 许月文,陈腾,张扬,等. 茎-叶类蔬菜收获机研究现状及发展对策[J]. 农业工程与装备, 2020(1): 20 - 26.
XU Yuewen, CHEN Teng, ZHANG Yang, et al. Research status and development countermeasures of stem - leaf vegetable harvester[J]. Agricultural Engineering and Equipment, 2020(1): 20 - 26. (in Chinese)

[3] 金月,肖宏儒,曹光乔,等. 我国茎叶类蔬菜生产关键环节的机械化作业模式[J]. 中国蔬菜, 2019(7): 7 - 11.
JIN Yue, XIAO Hongru, CAO Guangqiao, et al. Mechanized operation model of key links of stem and leaf vegetable production in China[J]. Chinese Vegetables, 2019(7): 7 - 11. (in Chinese)

[4] 姚森,杨其长,马伟,等. 蔬菜全程机械化生产研究现状及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2021(10): 1 - 7.
YAO Sen, YANG Qichang, MA Wei, et al. Research status and development trend of vegetable whole-process mechanization production[J]. Chinese Vegetables, 2021(10): 1 - 7. (in Chinese)

[5] 廖禺,陈立才,潘松,等. 叶类蔬菜机械化收获技术装备现状与发展[J]. 江西农业学报, 2019, 31(11): 77 - 81.
LIAO Yu, CHEN Licai, PAN Song, et al. Status and development of mechanical harvesting technology and equipment for leaf vegetables[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(11): 77 - 81. (in Chinese)

[6] 王伟,吕晓兰,王士林,等. 茎叶类蔬菜机械化收获技术研究现状与发展[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 117 - 127.
WANG Wei, LÜ Xiaolan, WANG Shilin, et al. Research status and development of mechanized harvesting technology for stem and leaf vegetables[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4): 117 - 127. (in Chinese)

[7] Hortch Inc. Machines for harvester[EB/OL]. (2019 - 08 - 15)[2025 - 01 - 21]. http:www. Hortech. it/en/prd/slide-crab.

[8] VIN ROWE. Hortech vegetable equipment [EB/OL]. (2024 - 03 - 26)[2025 - 01 - 21]. https://www.vinrowe.com.au/catalogue/equipment/vegetable-equipment/hortech-vegetable-equipment/.

[9] VAN NGUYEN N, SUGURU Y. Development of prototype harvester for head lettuce[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2015, 8(1): 18 - 25.

[10] 刘洪,张凯. 链轮提升式叶菜收割机的研究[J]. 农机使用与维修,2023(2):8 - 10.
LIU Hong, ZHANG Kai. Research on sprocket lift leafy vegetable harvester [J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance,2023(2):8 - 10. (in Chinese)

[11] 杜成成,林致闻,王锡玮,等. 芹菜收获机切割机构的设计及性能分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023, 49(4):533 - 540.
DU Chengcheng, LIN Zhiwen, WANG Xiwei, et al. Design and performance analysis of cutting mechanism of celery harvester [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology (Natural Science),2023,49(4):533 - 540. (in Chinese)

[12] 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 vegetable head harvester based on flexible grip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 162 - 169, 190. (in Chinese)

[13] 吐尔孙江·艾山. 自走式叶菜收获机的设计与试验[D]. 塔里木:塔里木大学,2023.
TURSUNJIANG AYSAN. Design and experiment of self-propelled leaf vegetable harvester [D]. Tarim: Tarim University, 2023. (in Chinese)

[14] 廖庆喜,王乾祥,万星宇,等. 自走式油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 126 - 138.
LIAO Qingxi, WANG Qianxiang, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of self-propelled rapeseed stalks harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):126 - 138. (in Chinese)

[15] 高龙,弋景刚,孔德刚,等. 小型智能叶菜类蔬菜收割机设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 147 - 150.
GAO Long, YI Jinggang, KONG Degang, et al. Design of small intelligent leaf vegetable harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 147 - 150. (in Chinese)

[16] 姚立健,刘宇,杨自栋,等. 一种叶菜打捆收集设备:CN202310097527. X [P]. 2023 - 04 - 04.

[17] 刘东. 鸡毛菜有序收获机关键部件的优化设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
LIU Dong. Optimization design and experimental research of key components of orderly harvesting machine for pilaf [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. (in Chinese)

[18] 李海同,江涛,关卓怀,等. 对行式油菜薹有序收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 92 - 101.
LI Haitong, JIANG Tao, GUAN Zhuohuai, et al. Design and experiment of row-following rapeseed stalks orderly harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):92 - 101. (in Chinese)

[19] 施印炎,章永年,汪小旦,等. 基于 Pro/E 的茎叶类蔬菜有序收获机设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 139 - 143.

SHI Yinyan, ZHANG Yongnian, WANG Xiaochan, et al. Design of orderly harvesting machine for stem and leaf vegetables based on Pro/E[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 139 - 143. (in Chinese)

[20] 王健,张秀花,弋景刚,等. 一种链条式韭菜打捆机:CN202222115664.5[P].2023 - 01 - 17.

[21] 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 and experiment of root cutter for spinach harvester based on discrete elements [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 85 - 98. (in Chinese)

[22] 向旺,孙玉华,刘凡一,等. 青菜头缩短茎滑切刀研制[J]. 农业工程学报,2023,39(16):266 - 275.
XIANG Wang, SUN Yuhua, LIU Fanyi, et al. Development of the sliding cutter for the shortened stem of tumorous stem mustard[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 266 - 275. (in Chinese)

[23] 王伟. 小青菜有序收获机关键部件设计与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
WANG Wei. Design and experimental study of key components of orderly harvesting machine for small green vegetables [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[24] 何涛,崔得州,杨全合,等. 低损捋叶式艾草脱叶装置设计与试验优化[J].农业机械学报,2024,55(增刊 2):122 - 133.
HE Tao, CUI Dezhou, YANG Quanhe, et al. Design and experimental optimization of low-destruction leaf-pulling *Artemisia argyi* defoliation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 122 - 133. (in Chinese)

[25] 刘天湖,麦宝锋,张锦翀,等. 链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置研究[J].农业机械学报,2024,55(10):116 - 125.
LIU Tianhu, MAI Baofeng, ZHANG Jinchong, et al. Design and experiment of chain feeding combined with roller and flexible rod breaking pineapple picking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 116 - 125. (in Chinese)

[26] 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)

[27] 邹亮亮,刘雪美,李金光,等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):72 - 79.
ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Research on gripper conveying device of spinach orderly harvester based on rheological characteristics analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 72 - 79. (in Chinese)

[28] 刘皓央,肖强,李鑫,等. 阶梯输送式茶叶采收分级一体机设计与试验[J].农业工程学报,2024, 40(17):52 - 60.
LIU Haoyang, XIAO Qiang, LI Xin, et al. Design and experiment of stepped conveying integrated tea harvesting and grading machine[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(17): 52 - 60. (in Chinese)

[29] 辛尚龙,赵武云,石林榕,等. 立辊式玉米收获割台夹持输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(9):34 - 43.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of gripper conveying device for vertical roller harvester and cutter[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 34 - 43. (in Chinese)

[30] 侯加林,李超,张智龙,等.双行手扶式大蒜联合收获机设计和试验(英文)[J].农业工程学报,2021,37(12):1 - 11.
HOU Jialin, LI Chao, ZHANG Zhilong, et al. Design and experiment of double-row hand-guided garlic combine harvester (English)[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 1 - 11.