

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.11.009

对行式油菜薹有序收获机设计与试验

李海同 江 涛 关卓怀 沐森林 吴崇友 张 敏

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对油菜薹机械化有序收获装备缺乏的问题,设计了一种对行式油菜薹有序收获机,完成油菜薹对行、夹持切割、柔性输送、有序铺放等收获环节。阐述了收获机整机结构和作业过程,根据切割、输送和铺放过程中油菜薹的运动学和动力学分析,确定了单圆盘切割器、夹持输送装置和导流板等部件的结构和运行参数,解析收获机参数对切割损伤率和铺放角变异系数的影响规律。研制对行式油菜薹有序收获机样机,以机器前进速度、切刀转速、输送带速度和导流板倾角为试验因素,以切割损伤率和铺放角变异系数为评价指标开展四因素三水平 Box - Behnken 田间试验。利用数据分析软件 Design-Export 10 建立试验指标与因素之间的二次多项式回归模型,分析各因素对试验指标的影响规律;求解切割损伤率和铺放角变异系数优化模型,得出最优参数组合为:机器前进速度 0.5 m/s,切刀转速 910 r/min,输送速度 0.75 m/s,导流板倾角 49°。验证试验表明,较优参数组合条件下切割损伤率为 4.95%,铺放角变异系数为 9.55%,与预测值之间的相对误差小于 5%,能够满足油菜薹有序收获需求。

关键词: 油菜薹有序收获机; 对行式; 单圆盘切割器; 田间试验

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0092-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Row-following Rapeseed Stalks Orderly Harvester

LI Haitong JIANG Tao GUAN Zhuohuai MU Senlin WU Chongyou ZHANG Min

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Rapeseed stalks are nutrient rich vegetable, but the harvesting of rapeseed stalks mainly relies on manual labor, because it is lack of mechanized harvesting equipment for rapeseed stalks, which seriously restricts the development of the rapeseed stalks production. In order to realizing mechanized harvesting for rapeseed stalks, a row-following rapeseed stalks orderly harvester was designed. The machine was mainly composed of narrow track chassis, divider, single disc cutter, flexible conveying device and motors to realize the functions of cutting, clamping, conveying, collecting and laying stalks. The overall structure and working process of harvesting were expounded. The parameters of the rotational speed and installation position of disc cutter were designed based on the clamping cutting theory. According to the kinematics and mechanical analysis of rape stalk in the process of conveying, the speed of conveyor and clearance between the two conveyors were designed. Based on the force balance conditions of the rapeseed stalk during the laying process, the range of the inclination angle of the guide plate was determined. The rapeseed stalks orderly harvester was developed, and field experiments with the cutting damage rate and variation coefficient of laying angle as the evaluation indexes were carried out. The quadratic polynomial regression models between the evaluation indexes and factors were established, and the influence of each factor on the evaluation indexes were analyzed. The optimal model for evaluation indexes was obtained. The results showed that the comprehensive cutting effect and orderly laying effect was the best when the machine forward speed was 0.5 m/s, the cutting blade speed was 910 r/min, the conveying speed was 0.75 m/s, and the inclination angle of the guide plate was 49°. The

收稿日期: 2023-08-25 修回日期: 2023-09-28
基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(S202302)、财政部和农业农村部:国家现代农业油菜产业技术体系专项(CARS-12)和南京市现代农机装备与技术创新示范项目(NJ[2022]04)
作者简介: 李海同(1987—),男,助理研究员,博士,主要从事收获机械研究,E-mail: lhtdolphin@163.com
通信作者: 张敏(1979—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物种植及收获技术装备研究,E-mail: zhangmin01@caas.cn

verification test showed that under the optimized parameter combination conditions, the cutting damage rate and variation coefficient of laying angle results were 4.95% and 9.55%, respectively, which met the requirements of rapeseed stalks orderly harvesting. The research result can provide reference for the design and parameters optimization of rapeseed stalks orderly harvesting equipment.

Key words: rapeseed stalks orderly harvester; row-following; single disc cutter; field experiment

0 引言

油菜是我国分布区域广、播种面积大的油料作物,常年种植面积超过 $7.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$,提供了 45% 以上的国产食用植物油。除了油菜籽作为优质食用油外,开发油菜的菜用、饲用、肥用、花用、蜜用等多种功能,是提高油菜种植综合效益的有效途径^[1]。油菜的菜用功能是在油菜抽薹期适时适度摘取主茎作为蔬菜食用,摘薹后的油菜植株茎叶继续生长收获菜籽,相关研究表明适时适度采摘油菜薹对油菜籽产量影响很小^[2-3],因此开发油菜“油蔬两用”功能,可显著提高油菜产业的经济效益。油菜薹粗壮、脆嫩、多汁、色泽鲜绿、回味香甜,富含铁、维生素 C 和钙、硒、锌等多种维生素和微量元素^[4-5],是一种营养丰富的蔬菜。但由于适用于油菜薹收获的装备缺乏,现阶段油菜薹采收环节完全依靠人工,劳动强度大、成本投入高,阻碍了油菜菜用功能的开发,因此产业上亟需研制油菜薹采收装备实现油菜薹机械化收获。

根据蔬菜的形态特征分类^[6-8],油菜薹为非结球类茎叶蔬菜,这类蔬菜收获机一般包括切割、输送和铺放等作业部件,按照收获后作物的铺放方式分为无序收获和有序收获^[9],无序收获机具结构简单,效率高,但收获后蔬菜品相不高^[10];有序收获后蔬菜品相较好,但机具结构复杂^[11]。

在茎叶类蔬菜无序收获方面,张瑞华等^[12]基于以空心菜为代表的绿叶类蔬菜特性,提出具有切割、收集、动力行走等功能的收获方案,研制了小型绿叶类蔬菜收获机,并优化切割、拨禾、输送和行走装置。秦广明等^[13]设计了一种高速双动小型手扶式叶菜收获机,通过双动往复式切割装置将柔性茎秆蔬菜齐根切断,实现三叶菜、菠菜等叶菜类蔬菜的方便、高效收获。申屠留芳等^[14]设计了一种履带田间自走式叶类蔬菜收获机,阐述设计叶类蔬菜收获机的关键技术、总体结构、工作原理以及关键工作机构与部件设计。高龙等^[15]通过功能树对机器功能进行分析,设计了一种小型智能自动化叶菜类蔬菜收割机,可依据不同的蔬菜智能调节割幅宽度与割茬高度,并对关键工作部件进行了优化设计。为实现油菜薹机械化收获,张文韬等^[16]借鉴立式油菜割晒

机的切割输送方式,研制了 4SYT-0.8 型自走式油菜薹收获机,主要由行走底盘、立式切割台、割台升降装置等组成;廖宜涛等^[17]设计了龙门式电驱动油菜薹收获机,采用龙门式履带底盘、立式回转抛切装置等部件,通过理论分析与台架试验确定最优结构和作业参数,实现油菜薹机械化收获。廖庆喜等^[18]研制了一种自走式油菜薹收获机,基于理论分析和台架试验确定优化参数组合,可实现自走、自动升降、茎叶统收,一次性完成油菜薹切割、输送与收集等工序。有序收获方面,章永年等^[19-20]建立作物输送时的力学模型,对柔性有序夹持输送机构的关键部件进行了设计,获得夹持输送机构对茎秆的夹持力,在此基础上研制茎叶类蔬菜有序收获机具,但无法适应油菜薹少碾压、茎叶低损伤的收获要求。

本研究根据油菜薹机械化有序收获需求,设计一种对行式油菜薹有序收获机,主要包括高地隙窄履带自走式底盘、分禾器、单圆盘切器、柔性夹持输送装置、导流板等部件,高地隙窄履带自走式底盘行走于两行油菜之间,降低机器对油菜的碾压损伤;对行式柔性夹持切割降低油菜薹茎叶低损伤。通过切割、柔性夹持输送、有序铺放过程运动学与动力学分析确定关键作业部件的结构和作业参数,以切割损伤率和铺放角变异系数为评价指标开展 Box-Behnken 田间试验,建立评价指标与试验参数之间的回归模型,优化得出油菜薹收获机的参数组合,为油菜薹有序收获装备设计和优化提供参考。

1 油菜薹收获机整机结构与工作过程

1.1 整机结构

对行式油菜薹有序收获机主要包括高地隙窄履带自走式底盘、圆盘切割器、输送装置、导流板、集料箱和升降推杆等装置,如图 1 所示。

高地隙窄履带自走式底盘主要包括机架、履带总成、动力传动系统、发电机、蓄电池和操作台等部件,自走式底盘采用橡胶履带,两条履带中心距 900 mm,单条履带宽度 180 mm;底盘最低离地间隙 500 mm,履带行走于油菜行间,履带宽度小于种植行距,减小收获机行走时对油菜的碾压损伤。机架及安装于采收台机架上的分禾器、柔性夹持输送带、导流板和输送带驱动电机等作业部件组成油菜薹有

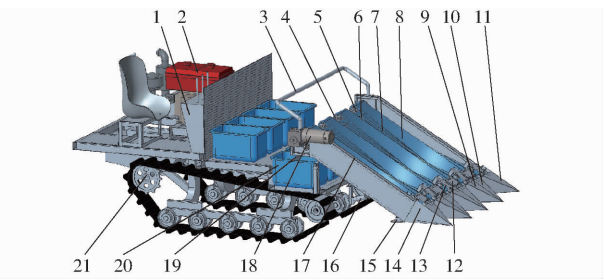


图 1 对行式油菜薹有序收获机结构示意图
Fig.1 Structural diagram of row-following rapeseed stalks orderly harvester

1. 操作台 2. 发动机 3. 采收台扶手 4. 输送带主动轴 5. 主动辊 6. 从动辊 7. 下输送带 8. 上输送带 9. 右分禾器 10. 左分禾器 11. 左边分禾器 12. 左从动辊固定架 13. 右从动辊固定架 14. 右边分禾器 15. 单圆盘切割器 16. 采收台升降推杆 17. 采收台机架 18. 输送带驱动电机 19. 导流板 20. 集料箱 21. 行走底盘

序收获采收台;分禾器两个为一组,呈前宽后窄的“八”字形成对安装于采收台机架前方;夹持输送装置为柔性夹持翻转结构,包括输送带、导向辊、被动辊和主动辊等部件,上下2条输送带为一组,从前到后呈倾斜向上状态,输送带下端与竖直方向存在30°夹角,上端呈水平状态;输送带由内层 PU 橡胶和外层 CR 泡绵粘合而成,内层 PU 橡胶依次包裹于导向辊、被动辊和主动辊外缘,用于传递动力,外层 CR 泡绵为柔性材料,用于夹持油菜薹,实现低损输送,4 组输送带由输送带电机驱动,转速可调;单圆盘切割器位于输送带下方,切刀平面与输送带下端面平行,切刀由直流无刷电机驱动,可无级调速;输送带上端下方安装导流板用于将采收的油菜薹有序铺放于集料箱内。采收台铰接于行走底盘上,可在采收台升降推杆的伸缩作用下绕铰接点旋转,调节采收高度以适应不同工况。油菜薹有序收获机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 油菜薹收获机主要技术参数 Tab.1 Main parameters of rapeseed stalks combine harvester	
参数	数值/型式
行走系统	高地隙窄履带自走式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 200×1 200×1 500
作业部件驱动形式	电动
功率/kW	7.5
作业速度/(km·h ⁻¹)	0.72~2.88
作业行数	4
采收高度/mm	100~500
圆盘切割转速/(r·min ⁻¹)	700~1 000
输送带线速度/(m·s ⁻¹)	0~1.3
收获方式	对行有序收获

1.2 工作过程

油菜薹收获机作业时,高地隙窄履带自走式底

盘行走于两行油菜之间,降低机器对油菜的碾压损伤,油菜被分禾器对行分开并聚拢至 2 条夹持输送带组成的输送通道内,随着输送带空间逐步减小,油菜植株在从动辊位置由输送带夹持固定,同时被输送带下方的圆盘切割器切断,上部切断的油菜薹由输送带稳定夹持并向后上方输送;油菜薹在输送过程中逐渐被翻转为水平状态,在主动辊位置脱离输送带并运动至导流板,而后在导流板的引导作用下倾斜向下运动并铺放于集料箱内;在输送带夹持翻转作用和导流板对油菜薹运动自由度的约束作用下,油菜薹基本呈头尾朝向一致的有序状态铺放于集料箱内,实现油菜薹有序收获。收获过程中,采收高度可通过电动推杆调节,圆盘切割转速、输送带速度可无级调速,可手动调节导流板倾角以满足不同形态、不同工况下油菜薹的收获需求。对行式油菜薹有序收获机工作过程如图 2 所示。

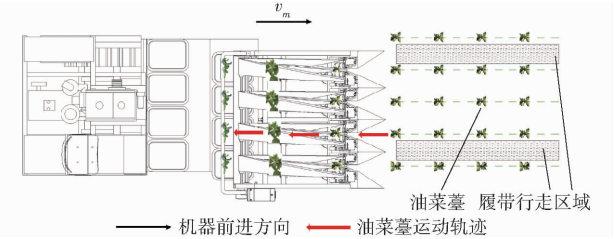


图 2 对行式油菜薹有序收获机作业过程
Fig.2 Working process of row-following rapeseed stalks orderly harvester

2 关键部件设计

2.1 输送装置设计

输送装置包括 4 组带式柔性夹持输送机构,每组机构主要包含主动辊、被动辊、上输送带、下输送带、从动辊、导向辊和从动辊支架等部件;4 组输送机构的上、下输送带上端分别同心套置于主动辊和被动辊,下端依次安装于从动辊和导向辊上,每组从动辊和导向辊呈“八”字形对称安装;主动辊和被动辊分别安装于主动轴上和被动轴上,主动轴和被动轴通过一对分度圆直径相等的换向齿轮传递动力,保证主动轴和被动轴同步转动;左、右从动辊固定架可前后调节张紧输送带,左从动辊固定架可左右移动以调节两条输送带之间的间隙,柔性夹持输送装置结构如图 3 所示。

收获机作业时,上、下输送带在驱动电机作用下以相反的转向向上运动,油菜植株经由分禾器收拢后进入由两条夹持输送带构成的输送通道内,依次通过导向辊、从动辊,在从动辊位置被 2 条输送带稳定夹持并被输送带下方的圆盘切割器切断,切断后的油菜薹由柔性输送装置向后上方输送,实现油菜

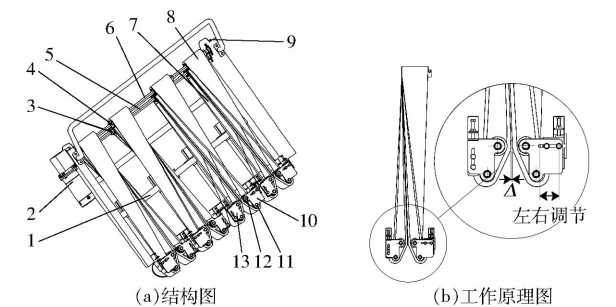


图 3 柔性夹持输送装置

Fig. 3 Schematics of flexible gripping device

1. 采收台机架 2. 输送带驱动电机 3. 被动辊 4. 主动辊
5. 输送带被动轴 6. 输送带主动轴 7. 下输送带 8. 上输送带
9. 换向齿轮 10. 左从动辊固定架 11. 导向辊 12. 从动辊
13. 右从动辊固定架

薹柔性低损夹持输送；输送装置将油菜薹由竖直姿态调整为离散的水平姿态，为有序铺放提供条件。输送过程中的夹持力由上下两条输送带挤压产生，夹持力过小会导致输送过程中油菜薹姿态不稳定，夹持力过大则会夹伤油菜薹。油菜物料特性测试结果显示，油菜植株切割处直径为 7.32 ~ 14.36 mm；加持输送试验结果表明两条输送带之间的间隙为 3 ~ 5 mm，可满足油菜薹夹持输送要求且不会夹伤油菜薹，因此上、下两条输送带之间的初始间隙 Δ 设置为 4 mm，且可根据油菜薹物料参数调节，如图 3b 所示。

输送带的运动速度为机器前进速度 v_m 与输送带倾斜向上运动速度 v_s 的合成，如图 4 所示。

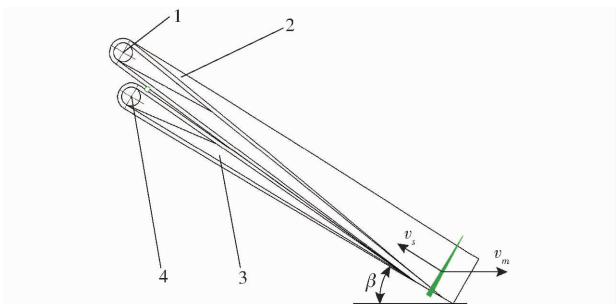


图 4 油菜薹茎秆输送过程速度分析

Fig. 4 Velocity analysis of stalk in conveying process

1. 主动辊 2. 上输送带 3. 下输送带 4. 被动辊

为保证油菜薹顺畅向后输送不发生堵塞，输送带在机器前进方向的速度须大于收获机前进速度，因此输送带速度和机器前进速度需满足

$$v_s \cos \beta > v_{m\max} \quad (1)$$

式中 $v_{m\max}$ ——收获机最大前进速度，取 0.8 m/s

β ——输送带与水平面夹角，(°)

而输送带速度为

$$v_s = n_s \pi d_s / 60 > v_m \quad (2)$$

式中 n_s ——主动辊转速，r/min

d_s ——输送带转动最大直径，取 0.08 m

根据收获机输送性能需求和集料箱放置需求，短输送带长度设计为 1 000 mm，输送带倾角 β 设计为 30°，则输送带距离底盘的高度为 500 mm，用于放置集料箱。由式(1)、(2)计算可得主动辊转速 $n_s > 221$ r/min。设计中，主动辊由直流无刷电机通过减速机驱动，设计转速为 0 ~ 360 r/min，即输送带线速度为 0 ~ 1.3 m/s，可通过驱动器实现无级调速。

2.2 单圆盘切割器设计

油菜薹切割是刚体割刀与柔性茎秆的直接互作过程，切割方式对切割性能具有重要影响，在油菜薹收获作业中需尽量降低茎秆损伤程度，提高采收品质的同时，确保割茬良好再生^[21]。往复式切割器切割过程中茎秆发生横向倾斜和纵向倾斜，两个方向上的倾斜增大了茎秆与切刀之间的相对滑移量，影响切口平整度和完整度。圆盘切割器工作时做回转运动，惯性力容易平衡，可提高切割速度，以减小切割时间和切割阻力，提高茎秆断面的平整度。而单、双支撑切割均是借助定刀或护刀器提供适当支撑以增强茎秆抗弯能力，因此该切割方式能很好的保证茎秆的直立度，提高切口完整度和平整度。本研究中设计单圆盘切割器与输送带配合实现夹持切割的切割方式，将单圆盘切割器置于输送带下方，油菜植株被输送带夹持固定的同时被圆盘切刀迅速切断，提高切口完整度，降低切割损伤，实现低损伤切割。

单圆盘切割器工作时切刀运动由切刀的圆周运动和收获前进运动合成，刀片刃口上任一点的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = R_c \cos(\omega_c t) \cos \delta \\ y = v_m t + R_c \sin(\omega_c t) \cos \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x, y) ——刀片刃口上任一点坐标，m

R_c ——圆盘切刀半径，取 0.075 m

ω_c ——圆盘切刀旋转角速度，rad/s

t ——圆盘切刀转动时间，s

δ ——切刀平面与水平面夹角，取 30°

切口刃口上任一点对地面的轨迹为摆线，其形状、大小等特性由圆盘切刀线速度与收获机前进速度的比值即切刀速比 λ 决定。为保证作业过程中油菜薹能够顺利进入输送通道，切割过程中切刀须始终具有向后的水平分速度，即切刀的线速度需大于收获机前进速度，速比 $\lambda > 1$ ，此时切刀刃口上任一点的运动轨迹为余摆线，则

$$v_c \cos \beta / v_m = \pi R_c n_c \cos \delta / (30 v_{m\max}) > 1 \quad (4)$$

式中 v_c ——圆盘切刀刃口上任一点线速度，m/s

n_c ——圆盘切刀转速，r/min

由式(4)计算可得圆盘切刀转速 $n_c > 118$ r/min。

单圆盘切割器在满足油菜薹顺利通过的基础

上,还需满足低损伤切割要求,根据前期油菜薹田间试验效果,参考文献[22],切割器转速设计为700~1 000 r/min,可无级调速。

切割过程中切刀对油菜薹的切割力 F_c 作用于夹持点且与切刀平面相切,如图5a所示,切割力可分解为竖直方向分力和水平面上的分力。竖直方向作用力由夹持力抵消防止切割过程中油菜薹上下滑动,考虑水平面上的分力 F_{cxy} 对油菜薹的作用^[23]。作用于夹持切割点 M 的作用力 F_{cxy} 可分解为机器前进方向及其切向的作用力 F_{cx} 和 F_{cy} ,其中 F_{cx} 引起油菜薹前后扰动, F_{cy} 引起油菜薹左右扰动,如图5b所示,油菜薹受力方程为

$$\begin{cases} F_c = mr\omega_c^2 \\ F_{cxy} = F_c \cos\delta \\ F_{cx} = F_c \cos\delta \cos\alpha \\ F_{cy} = F_c \cos\delta \sin\alpha \\ \tan\alpha = \frac{y_M}{x_M} \end{cases} \quad (5)$$

式中 F_{cxy} ——切刀对油菜薹的切割力,N
 F_{cx} ——切割力在 x 方向上的分力,N
 F_{cy} ——切割力在 y 方向上的分力,N
 m ——油菜薹质点质量,kg
 α ——切割力与 x 轴夹角,(°)
 (x_M, y_M) ——切割点坐标

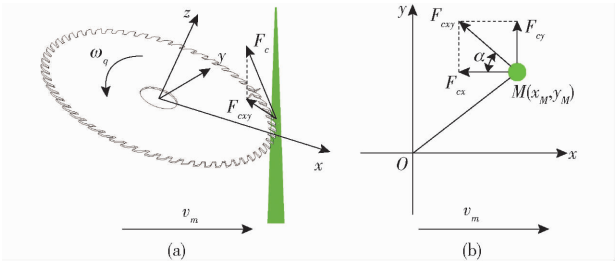


图5 切割过程中油菜薹受力分析

Fig.5 Force analysis of stalk in cutting process

切割器只能在切刀前方切割油菜植株,因此, $\alpha \in [45^\circ, 135^\circ]$ 。由式(5)可知,当 $\alpha \in [-45^\circ, 90^\circ]$ 时, F_{cx} 方向向前且随 α 的增大而减小, F_{cy} 方向向上且随 α 的增大而增大;当 $\alpha \in [90^\circ, 135^\circ]$ 时, F_{cx} 方向向后且随 α 的增大而增大, F_{cy} 方向向上且随 α 的增大而减小。 F_{cx} 向前将会出现推倒油菜植株而造成切割损伤,因此 α 取值范围为 $[90^\circ, 135^\circ]$;为避免油菜薹在单个方向上扰动过大而引起切割损伤,令 $F_{cx} = F_{cy}$,此时 $\alpha = 135^\circ$ 。因此,圆盘切割器安装时,夹持点 M 相对于切刀中心 O 的坐标为(53 mm,53 mm)。

2.3 导流板设计

油菜薹脱离输送带后处于无约束的完全自由运动状态,掉落至集料箱内后易形成杂乱无序的状态,

难以实现有序铺放效果。因此在输送装置下方安装导流板,其作用是约束油菜薹铺放过程中的自由度,使其只有沿导流板方向的直线运动,提高有序铺放效果。油菜薹收获试验结果表明,安装导流板可显著提高油菜薹铺放的有序性,基本实现头尾朝向一致的有序状态,如图6所示。



图6 有无导流板铺放效果对比

Fig.6 Comparison of laying effects with and without deflectors

油菜薹脱离输送带后在导流板上运动过程中,受力如图7所示。

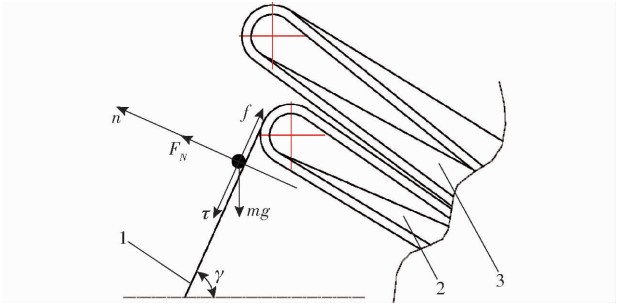


图7 铺放过程中油菜薹受力分析

Fig.7 Force analysis of stalk in laying process

1. 导流板 2. 下输送带 3. 上输送带

在导流板法向 n 和切向 τ 的受力方程为

$$\begin{cases} F_n = F_N - mg \sin\gamma = 0 \\ F_\tau = mg \cos\gamma - f = ma_\tau \\ f = F_N \mu \end{cases} \quad (6)$$

式中 F_n ——油菜薹在导流板法向所受合力,N
 F_τ ——油菜薹在导流板切向所受合力,N
 F_N ——导流板对油菜薹的支撑力,N
 g ——重力加速度, m/s^2
 f ——导流板与油菜薹之间摩擦力,N
 μ ——导流板与油菜薹之间摩擦因数
 γ ——导流板倾角,(°)
 a_τ ——油菜薹沿导流板切向加速度, m/s^2

为保证油菜薹在导流板上顺畅运动,油菜薹在导流板切向加速度应向下,即 $a_\tau > 0$,由式(6)可得导流板倾角范围为 $\cot\gamma > \mu$ 。根据文献[17~18],导流板与油菜薹之间的摩擦因数 μ 取0.6,计算可得 $\gamma < 58^\circ$,且导流板倾角越小,铺放过程中油菜薹加速度越小,倾角越大,油菜薹加速度越大。导流板倾角过小,导致油菜薹在导流板上运动速度太小,出

现运动不畅的问题,无法顺利铺放至集料箱内;导流板倾角过大,导致油菜薹在导流板上运动速度太大且可能出现翻滚,不利于实现有序铺放,因此导流板需选择合适倾角,以实现有序铺放。

3 参数优化试验

在确定关键部件结构和参数的基础上,研制油菜薹有序收获机样机,设计 Box – Behnken 试验开展油菜薹有序收获机田间试验,研究作业参数对收获性能的影响规律并优化参数组合。

3.1 试验方法

根据前文油菜薹收获机参数理论计算和收获质量影响因素分析结果,影响切割损伤率和铺放角变异系数的主要参数包括油菜薹收获机前进速度、切刀线速度、切割位置、输送带速度、导流板倾角等,需进一步通过性能试验研究各因素及其交互关系对收获质量的影响规律。但由于影响因素较多,实际试验中难以将所有因素作为变量开展田间试验,设计中切刀刃口曲线和切割位置已确定,因此研究机器前进速度、单圆盘切刀转速、输送带速度和导流板倾角对有序收获质量的影响并进行参数优化设计。

油菜薹收获机的设计速度为 0.2 ~ 0.8 m/s,为兼顾作业效率和稳定性,试验中前进速度设置 0.4、0.6、0.8 m/s 3 个水平;切割器设计转速为 700 ~ 1 000 r/min,根据切割预试验结果,切刀转速设置为 800、900、1 000 r/min 3 个水平;根据前文油菜薹茎秆输送过程分析结果,为实现油菜薹顺畅输送,输送带速度设置为 0.4、0.7、1.0 m/s 3 个水平;为保证油菜薹在导流板上顺畅运动,导流板倾角的范围为 $\gamma < 58^\circ$,预试验结果表明当倾角小于 45° 时,油菜薹铺放有序性显著降低,因此导流板倾角设置为 45° 、 50° 、 55° 3 个水平。各试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Codes of test factors

编码	因素			
	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	切刀转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	输送带速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	导流板倾 角/ $(^\circ)$
-1	0.4	800	0.4	45
0	0.6	900	0.7	50
1	0.8	1 000	1.0	55

参照相关农业收获机械试验方法和标准^[24-25],本研究中采用切割损伤率和铺放角变异系数分别作为油菜薹切割质量和铺放质量的评价指标开展田间试验。

油菜薹有序收获机试验于 2023 年 2 月在江苏省吴江国家现代农业示范区开展,试验油菜薹品种

为苏油薹 1 号,播种方式为机械移栽,油菜平均行距 300 mm,平均株距 250 mm,试验时油菜植株高度 446 ~ 525 mm,平均高度为 452 mm。试验仪器与设备包括自走式油菜薹有序收获机、卷尺、角度尺、相机等。试验测试区长度为 20 m,其中准备区 5 m,测试区 15 m,试验结束后测试并计算切割损伤率和铺放角变异系数,如图 8 所示。

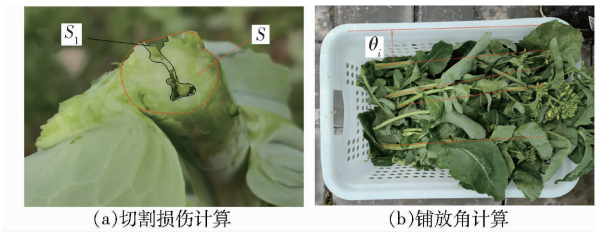


图 8 试验指标计算方法

Fig.8 Calculation method for experiment index

参照文献[26]中毛茛面积比计算方法,对采集的油菜薹样本进行拍照、预处理后,运用 Matlab 软件图像处理功能计算损伤面积与茎秆断面总面积的比值,得出油菜薹切割损伤率 Y_1 并作为切割质量评价指标,切割损伤率越小,切割质量越好。

$$Y_1 = \frac{S_1}{S} \times 100\% \tag{7}$$

式中 S_1 ——油菜薹断面上毛茛部分面积, mm^2

S ——油菜薹断面总面积, mm^2

用角度尺测量油菜薹主茎秆中轴线与水平线的夹角 θ_i 作为铺放角,每次试验测试 10 组铺放角,计算铺放角变异系数 Y_2 并作为铺放质量评价指标,铺放角变异系数越小,有序铺放质量越好。

$$Y_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (\theta_i - \bar{\theta})^2}}{\bar{\theta}} \times 100\% \tag{8}$$

式中 $\bar{\theta}$ ——铺放角平均值, $(^\circ)$

3.2 试验结果与分析

根据 Box – Behnken 响应面试验方案,田间试验共 29 组^[27],试验方案及结果如表 3 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。

3.2.1 回归模型建立与显著性检验

利用数据分析软件 Design-Expert 10 进行多元回归拟合分析,建立油菜薹收获机切割损伤率 Y_1 和铺放角变异系数 Y_2 与机器前进速度 X_1 、圆盘切刀转速 X_2 、输送带速度 X_3 、导流板倾角 X_4 之间的二次多项式回归模型

$$\begin{aligned} Y_1 = & 4.9 + 1.42X_1 - 0.68X_2 - 1.2X_3 - 0.013X_4 - \\ & 0.1X_1X_2 - 2.5X_1X_3 + 0.025X_1X_4 - 0.44X_2X_3 + \\ & 0.023X_2X_4 - 0.02X_3X_4 + 2.07X_1^2 + 2.6X_2^2 + \\ & 1.97X_3^2 + 0.88X_4^2 \end{aligned} \tag{9}$$

表 3 试验方案及结果
Tab. 3 Test scheme and values

试验号	因素				切割损伤率	铺放角变异系数
	前进速度 X_1	切刀转速 X_2	输送带速度 X_3	导流板倾角 X_4	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	1	0	1	7.22	12.75
2	-1	0	-1	0	5.64	10.26
3	0	0	0	0	5.65	9.46
4	-1	-1	0	0	8.68	9.84
5	-1	0	0	1	6.62	12.45
6	0	-1	0	-1	8.08	10.96
7	0	0	-1	1	9.85	16.65
8	0	-1	-1	0	11.62	12.64
9	1	1	0	0	10.74	10.43
10	0	-1	0	1	8.03	12.89
11	-1	0	1	0	9.12	12.15
12	0	0	1	-1	6.08	13.36
13	1	0	-1	0	12.15	14.56
14	1	0	0	-1	10.28	14.55
15	1	0	1	0	5.64	10.45
16	0	0	0	0	4.86	9.67
17	0	-1	1	0	10.55	11.55
18	0	0	1	1	6.05	15.56
19	0	0	0	0	4.25	8.57
20	0	0	0	0	4.50	9.97
21	0	0	0	0	5.25	10.15
22	0	1	1	0	7.80	11.65
23	1	-1	0	0	12.28	12.25
24	0	0	-1	-1	9.80	15.15
25	-1	1	0	0	7.55	9.75
26	-1	0	0	-1	6.75	11.55
27	1	0	0	1	10.25	17.02
28	0	1	0	-1	7.18	10.95
29	0	1	-1	0	10.62	12.68

$$Y_2 = 9.5 + 0.99X_1 + 0.33X_2 - 1.19X_3 + 0.3X_4 + 0.72X_1X_2 - 1.41X_1X_3 - 0.42X_1X_4 - 0.012X_2X_3 + 0.26X_2X_4 + 0.55X_3X_4 + 0.13X_1^2 + 0.48X_2^2 + 1.75X_3^2 + 3.48X_4^2 \quad (10)$$

由方差分析可知(表 4),油菜薹切割损伤率 Y_1 和铺放角变异系数 Y_2 回归模型的 P 值均小于 0.01,表明回归模型高度显著;失拟项 P 值均大于 0.05,表明回归模型拟合度高;决定系数 R^2 分别为 0.901 和 0.892,表明回归模型对样本数据解释程度较高,可用来预测和分析收获油菜薹的切割质量和铺放质量。因素 X_1 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对切割损伤率 Y_1 影响极显著,因素 X_2 对切割损伤率 Y_1 影响显著,其他因素影响不显著,各因素对切割损伤率影响显著性由大到小顺序为 X_1 、 X_3 、 X_2 、 X_4 。原因在于当机器前进速度和输送带速度取得较优匹配关系时,输送带稳定夹持油菜薹,单圆盘切割器在有支撑条件下

切割油菜,切割损伤较小;当机器前进速度和输送带速度匹配关系不当而导致油菜薹夹持不稳定时,圆盘切割器将在无支撑条件下切割油菜,此时切割损伤较大。因素 X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_3^2 、 X_4^2 对铺放角变异系数 Y_2 影响极显著,因素 X_1X_3 、 X_1^2 对铺放角变异系数 Y_2 影响显著,其他因素影响不显著,各因素对铺放角变异系数影响显著性由大到小顺序为 X_4 、 X_3 、 X_1 、 X_2 。

3.2.2 响应面分析

根据油菜薹切割损伤率和铺放角变异系数的试验结果和回归模型,绘制对试验指标影响显著的交互作用的影响面,结果如图 9、10 所示。

图 9 为切刀转速和导流板倾角位于中心水平 ($X_2 = 0, X_4 = 0$) 时,前进速度与输送带速度交互作用对切割损伤率的响应面。当前进速度固定在某一水平时,随着输送带速度增加,切割损伤率呈现先减小后增加的趋势,且输送带速度在 0.5 ~ 0.8 m/s 范围内有最优值;当输送带速度固定在某一水平时,切割损伤率随前进速度增加呈现先减小而后增加的趋势,且在 0.4 ~ 0.7 m/s 范围内取最优值。

图 10 为圆盘切刀转速和导流板倾角位于中心水平 ($X_2 = 0, X_4 = 0$) 时,前进速度与输送带速度交互作用对铺放角变异系数的响应面。当前进速度固定在某一水平时,随着输送带速度增加,铺放角变异系数呈现先减小后增加的趋势,且输送带速度在 0.5 ~ 0.8 m/s 范围内有最优值;当输送带速度固定在某一水平时,铺放角变异系数随前进速度增加呈现先减小而后增加的趋势。

3.3 参数优化

根据方差分析和响应面分析结果,剔除回归模型中的不显著项,优化切割损伤率 Y_1 和铺放角变异系数 Y_2 的回归模型,结果为

$$Y_1 = 5.47 + 1.42X_1 - 0.68X_2 - 1.2X_3 - 0.013X_4 - 2.5X_1X_3 + 1.9X_1^2 + 2.49 \times 10^{-4}X_2^2 + 1.81X_3^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 9.87 + 0.99X_1 + 0.33X_2 - 1.19X_3 + 1.3X_4 - 1.41X_1X_3 + 1.04X_1^2 + 1.66X_3^2 + 3.39X_4^2 \quad (12)$$

根据油菜薹有序收获机结构和作业参数、田间试验结果,参考茎叶类蔬菜收获机质量评价技术规范^[24]和油菜割晒机铺放质量^[25]等相关评估标准,选择确定优化模型的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \\ -1 \leq X_4 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

表 4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

方差来源	切割损伤率					铺放角变异系数				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	145.167	14	10.369	9.168	<0.000 1 **	150.95	14	10.78	8.31	<0.000 1 **
X_1	24.027	1	24.027	21.243	0.000 4 **	11.84	1	11.84	9.13	0.009 2 **
X_2	5.508	1	5.508	4.870	0.045 *	1.27	1	1.27	0.98	0.338 5
X_3	17.376	1	17.376	15.363	0.002 **	17.11	1	17.11	13.19	0.002 7 **
X_4	1.875×10^{-3}	1	1.875×10^{-3}	1.658×10^{-3}	0.968	20.18	1	20.18	15.56	0.001 5 **
X_1X_2	0.042	1	0.042	0.037	0.850	2.09	1	2.09	1.61	0.225 2
X_1X_3	24.950	1	24.950	22.060	0.000 3 **	7.95	1	7.95	6.13	0.026 7 *
X_2X_3	2.5×10^{-3}	1	2.5×10^{-3}	2.21×10^{-3}	0.963	0.7	1	0.7	0.54	0.475 5
X_1X_4	0.766	1	0.766	0.677	0.424	6.25×10^{-4}	1	6.25×10^{-4}	4.82×10^{-4}	0.982 8
X_2X_4	2.21×10^{-3}	1	2.205×10^{-3}	1.79×10^{-3}	0.967	0.28	1	0.28	0.21	0.651 9
X_3X_4	1.6×10^{-3}	1	1.6×10^{-3}	1.415×10^{-3}	0.971	1.21	1	1.21	0.93	0.350 5
X_1^2	27.812	1	27.812	24.590	0.000 2 **	8.29	1	8.29	6.39	0.024 1 *
X_2^2	45.617	1	45.617	40.333	<0.000 1 **	1.49	1	1.49	1.15	0.302
X_3^2	25.254	1	25.254	22.329	0.000 3 **	19.9	1	19.9	15.35	0.001 5 **
X_4^2	5.045	1	5.045	4.461	0.053	78.58	1	78.58	60.58	<0.000 1 **
残差	15.834	14	1.131				18.16	14	1.3	
失拟项	14.565	10	1.457	4.59	0.078	16.64	10	1.66	4.38	0.083 6
误差	1.269	4	0.317			1.52	4	0.38		
总和	161	28				169.11	28			

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

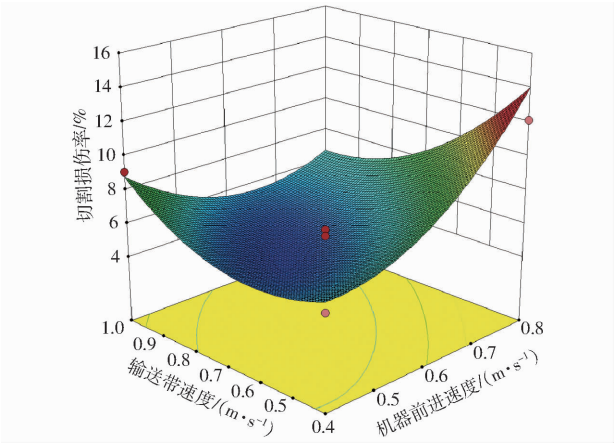


图 9 交互作用对切割损伤率影响的响应面
Fig.9 Effects of interactive factors on cutting damage rate

运用 Design-Expert 中的 Optimization 模块对目标方程进行优化求解,得出收获机的最优参数组合:机器前进速度 0.54 m/s,切刀转速 911 r/min,输送带速度 0.76 m/s,导流板倾角 49.1°,此时模型预测的切割损伤率为 4.63%,铺放角变异系数为 9.14%。

3.4 田间试验验证

对优化参数进行适当圆整:机器前进速度 0.5 m/s,切刀转速 910 r/min,输送带速度 0.75 m/s,导流板倾角 49°,根据圆整结果进行田间试验验证,试验重复 3 次并取结果的平均值作为试验指标,田间作业效果如图 11 所示,验证试验结果如表 5 所示。

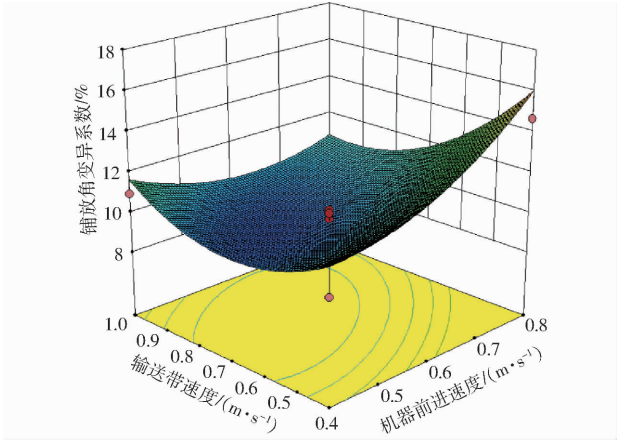


图 10 交互作用对铺放角变异系数影响的响应面
Fig.10 Effects of interactive factors on variation coefficient of laying angle



图 11 田间试验
Fig.11 Field experiment

田间试验结果表明,油菜薹收获机切割损伤率和铺放角变异系数的试验平均值和模型预测值

的相对误差均小于 5% ,且均优于未优化时的试验指标,说明采用最优工作参数组合能够有效优化切割质量和铺放质量,提高油菜薹有序收获机作业效果。

表 5 验证试验结果
Tab.5 Verification testing results %

序号	切割损伤率	铺放角变异系数
1	5.34	10.05
2	4.92	9.65
3	4.60	8.75
试验平均值	4.95	9.55
模型预测值	4.72	9.13
相对误差	4.94	3.87

4 结论

(1)针对油菜薹机械化收获需求,设计了一种对行式油菜薹有序收获机,主要包括高地隙窄履带自走式底盘、分禾装置、切割装置、输送装置和导流板等部件,实现油菜薹分行、切割、柔性夹持翻转输

送、有序铺放等收获功能。

(2)根据油菜薹有序收获机作业过程,确定主要部件参数:输送辊转速为 0 ~ 360 r/min,输送带线速度为 0 ~ 1.3 m/s,两条输送带之间的间隙为 4 mm;单圆盘切刀安装位置为(53 mm,53 mm),转速为 700 ~ 1 000 r/min;导流板倾角小于 58°。

(3)采用 Box - Behnken 中心组合试验设计开展油菜薹有序收获田间试验,以切割损伤率和铺放角变异系数为评价指标建立响应面模型,通过方差分析和响应面分析,得出了整机前进速度、切刀转速、输送带速度和导流板倾角及其交互作用对试验评价指标的影响规律。

(4)建立切割损伤率和铺放角变异系数的回归模型并进行优化求解,优化参数组合:机器前进速度 0.5 m/s,切刀转速 910 r/min,输送带速度 0.75 m/s,导流板倾角 49°。验证试验结果表明,较优参数组合条件下切割损伤率为 4.95%,铺放角变异系数为 9.55%,与预测值之间的相对误差小于 5%,满足油菜薹有序收获需求。

参 考 文 献

[1] 张哲,殷艳,刘芳,等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):618-623.
ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2018, 40(5): 618-623. (in Chinese)

[2] 张宗急,毛玲莉,钟丽,等. 不同摘薹方式对菜用型油菜菜薹、籽粒产量及经济效应的影响[J]. 西南农业学报,2017,30(4):734-738.
ZHANG Zongji, MAO Lingli, ZHONG Li, et al. Effect of different branches removing methods of vegetable rape on yield, rapeseed and economic effect[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(4): 734-738. (in Chinese)

[3] 鲁剑巍,鲁君明,任涛,等. 油菜收获菜薹对菜籽产量的影响及增收效果[J]. 长江蔬菜,2019(14):36-37.
LU Jianwei, LU Junming, REN Tao, et al. Effects of bolt harvest on rapeseed yield and income increase[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2019(14): 36-37. (in Chinese)

[4] 黄颖,吴婷,曹伟伟,等. 基于主成分和聚类分析的油菜薹营养与感官品质评价[J]. 食品与发酵工业,2020,46(17):253-258.
HUANG Ying, WU Ting, CAO Weiwei, et al. Evaluation of nutrition and sensory quality of flowering Chinese cabbage based on principal component and cluster analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 253-258. (in Chinese)

[5] 孙灵湘,孙华,王毓宁,等. 油蔬两用型油菜不同采摘期下油菜薹的品质变化研究[J]. 农产品质量与安全,2021(2):74-79.
SUN Lingxiang, SUN Hua, WANG Yuning, et al. The study on bolt quality of rape for oilseed-vegetable-dual-purpose in different picking periods[J]. Quality and Safety of Agro-products, 2021(2): 74-79. (in Chinese)

[6] 王俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报,2014,45(2):81-87.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81-87. (in Chinese)

[7] 陆海涛,吕建强,金伟,等. 我国叶类蔬菜机械化收获技术的发展现状[J]. 农机化研究,2018,40(6):261-268.
LU Haitao, LÜ Jianqiang, JIN Wei, et al. The current situation of the mechanized harvesting technology development of leaf vegetable in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 261-268. (in Chinese)

[8] 金月,肖宏儒,肖苏伟,等. 叶类蔬菜收获技术与装备研究现状及发展趋势[J]. 中国农业科技导报,2018,20(9):72-78.
JIN Yue, XIAO Hongru, XIAO Suwei, et al. Research statue and development tendency on leaf vegetable harvesting technology and equipment[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(9): 72-78. (in Chinese)

[9] 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 vegetable[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 15-23. (in Chinese)

[10] 许月文,谢伟,刘迪,等. 茎叶类蔬菜收获机的研究现状及发展对策[J]. 农业工程与装备,2020,47(1):20-26.
XU Yuewen, XIE Wei, LIU Di, et al. Status and development of stem leaf vegetable harvester[J]. Agricultural Engineering

- and Equipment, 2020, 47(1): 20–26. (in Chinese)
- [11] 廖禹,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 mechanized harvesting technology and equipment for leaf vegetables[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(11): 77–81. (in Chinese)
- [12] 张瑞华,施俊侠,张日红,等. 小型绿叶类蔬菜收获机的收获方案及切割装置设计[J]. 农业科技与装备,2015(10): 11–13,16.
ZHANG Ruihua, SHI Junxia, ZHANG Rihong, et al. Harvest scheme and cutter design of small green leafy vegetables harvester[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(10): 11–13, 16. (in Chinese)
- [13] 秦广明,赵映,肖宏儒,等. 高速双动小型手扶式叶菜收获机设计与动力分析[J]. 中国农机化学报,2015,36(5): 9–12.
QIN Guangming, ZHAO Ying, XIAO Hongru, et al. Design and movement analysis of double-acting cutting device of small walking leafy vegetables harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 9–12. (in Chinese)
- [14] 申屠留芳,张炎,孙星钊,等. 叶类蔬菜收获机的设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(11): 20–23.
SHENTU Liufang, ZHANG Yan, SUN Xingzhao, et al. Design of leafy vegetable harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 20–23. (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 a small intelligent leafy vegetable harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 147–150. (in Chinese)
- [16] 张文韬,吴明亮,谢伟,等. 4SYT-0.8 型自走式油菜薹收割机的设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2020, 46(3): 376–380.
ZHANG Wentao, WU Mingliang, XIE Wei, et al. Design of 4SYT-0.8 self-propelled rape bolt harvester[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(3): 376–380. (in Chinese)
- [17] 廖宜涛,李运通,万星宇,等. 龙门式电驱动油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12): 147–159.
LIAO Yitao, LI Yuntong, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of gantry type electric drive rapeseed stalks harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 147–159. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 章永年,施印炎,汪小岳,等. 茎叶类蔬菜有序收获机柔性夹持输送机构设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(9): 48–51.
ZHANG Yongnian, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design on flexible champing-conveying mechanism of orderly harvester for stems-leafy vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(9): 48–51. (in Chinese)
- [20] 施印炎,章永年,汪小岳,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 harvester in stems-leafy vegetables based on Pro/E[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 139–143. (in Chinese)
- [21] 吴坤,宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6): 1–20.
WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1–20. (in Chinese)
- [22] 刘羊,黄小毛,马丽娜,等. 拨禾链式油葵割台静态滑切角恒定切割器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(1): 99–108.
LIU Yang, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and test of static sliding cut angle constant cutting machine for chain oil sunflower harvester header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 99–108. (in Chinese)
- [23] 李天华,孟志伟,丁贺贺,等. 甘蓝切根作业力学分析与参数优化[J]. 农业工程学报,2020,36(7): 63–72.
LI Tianhua, MENG Zhiwei, DING Hehe, et al. Mechanical analysis and parameter optimization of cabbage root cutting operation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 63–72. (in Chinese)
- [24] 手扶式叶菜类蔬菜收获机质量评价技术规范: NY/T 3663—2020[S]. 2020.
- [25] 割晒机 技术条件: JB/T 7733—2007[S]. 2007.
- [26] 张佳喜,黄涛,王茂博. 单马达往复葡萄剪枝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8): 106–116.
ZHANG Jiayi, HUANG Tao, WANG Maobo. Design and experiment of single motor reciprocating grape pruning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 106–116. (in Chinese)
- [27] 侯加林,陈彦宇,李玉华,等. 定量铺放自走式大葱联合收获机研制[J]. 农业工程学报,2020,36(7): 22–33.
HOU Jialin, CHEN Yanyu, LI Yuhua, et al. Development of quantitatively-laying and self-propelled green onion combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 22–33. (in Chinese)