

自走式油菜薹收获机设计与试验

廖庆喜^{1,2} 王乾祥^{1,2} 万星宇^{1,2} 杜子健^{1,2} 李运通^{1,2} 曹士川^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对现有油菜薹收获机械匮乏,人工采摘效率低、成本高等问题,结合油菜薹生物学特性与农艺要求,研制了一种自走式油菜薹收获机,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。基于动力学与运动学分析了油菜薹收获切割、输送及收集过程,得出了影响收获效率的主要因素,开展了切割装置、拨禾装置、输送装置、割台双升降系统的设计与参数分析。以前进速度、切割线速度、输送带线速度及拨禾轮转速为因素,油菜薹收获漏割率、输送失败率及茎叶破损率为评价指标,开展了二次回归正交旋转台架试验,应用综合评分法确定了最优作业参数组合为:前进速度 0.56 m/s、切割线速度 0.50 m/s、输送带线速度 0.79 m/s、拨禾轮转速 49.70 r/min,在最优参数组合下,油菜薹收获效果较优。田间试验结果表明收获机作业后割茬整齐,在最佳参数组合下,漏割率为 4.28%,输送失败率为 3.42%,茎叶破损率为 6.39%,可满足油菜薹实际生产需求。

关键词: 油菜; 油菜薹收获机; 自走式; 割台双升降系统

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0126-13

OSID: 

Design and Experiment of Self-propelled Rapeseed Stalks Harvester

LIAO Qingxi^{1,2} WANG Qianxiang^{1,2} WAN Xingyu^{1,2} DU Zijian^{1,2} LI Yuntong^{1,2} CAO Shichuan^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Due to the requirements of multi-functional development of rapeseed for vegetable use, the existing rapeseed stalks harvesting machinery is insufficient, manual picking efficiency is low, and the cost is high. Combined with biological characteristics and agronomic requirements of rapeseed stalks, a self-propelled rapeseed stalks harvester was developed, which could realize self-propelled, automatic lifting, unified harvesting of stems and leaves, and complete cutting, conveying and collecting of rapeseed stalks at one time. Based on dynamics and kinematics analysis of rapeseed stalks harvest cutting, conveying and gathering phase, main factors that influencing the efficiency of the harvest were carried out, the design and parameter analysis of the cutting device, reel device, transmission device and cutting table double lifting system were carried out. The former feeding speed, cutting line speed, conveyor belt speed and rotating wheel speed were taken as factors, and the rapeseed stalks harvesting missed cutting rate, transportation failure rate and stem and leaf damage rate were taken as evaluation indexes. The quadratic regression orthogonal rotating bench test was carried out, and the comprehensive scoring method was used to determine the optimal operation parameters: forward speed was 0.56 m/s, cutting line speed was 0.50 m/s, the conveyor belt speed was 0.79 m/s and the rotary speed was 49.70 r/min. Under the optimal parameter combination, the rapeseed stalks harvesting effect was the better. The results of field experiment showed that the harvester cut the stubble in order after operation. Under the optimal combination of parameters, the rate of missed cutting was 4.28%, the rate of transport failure was 3.42%, and the damage rate of stem and leaf was 6.39%, which could meet the actual production demand of rapeseed stalks. The research result could provide reference for the structural design and optimization of rapeseed stalks harvester.

Key words: rape; rapeseed stalks harvester; self-propelled; double lifting device for cutting table

0 引言

油菜薹即“绿菜薹”，指油菜抽薹期其主茎所抽出的嫩薹，是基于油菜油用、菜用、饲用等全价值链多功能开发形成的功能型蔬菜^[1-3]，富含维生素 C、硒、钙、锌等营养元素，可有效缓解冬季蔬菜品种供应不足的问题。现阶段，油菜薹采摘主要依靠人工进行，劳动强度大、效率低等问题严重制约油菜薹产业发展。

目前，国外茎叶类蔬菜机械化收获技术已较为成熟^[4]。如意大利 HORTECH 公司研制的 SLIDETVALERIANA 型叶菜类收获机、VALERIANA 型叶菜收获机、Slide TW 型蔬菜收获机等，意大利 ORTOMECH 公司研制的 8400ELECTRA 型蔬菜收获机等。但其结构相对复杂，成本较高^[5]。我国茎叶类蔬菜收获机近些年发展迅速，针对蔬菜机械化收获技术的迫切需求，开展了一系列研究，主要研究对象集中在胡萝卜、甘蓝、大葱等作物。如金鑫等^[6]设计了一种胡萝卜收获机，杜冬冬等^[7]研发了自走式甘蓝收获机，王方艳等^[8]设计了一种自走式大葱联合收获机。在作物切割方面，主要采用双圆盘式切割器、单圆盘式切割器和往复式切割器^[9-11]；在作物输送方面，主要采用输送带式、同步带夹持式及柔性夹持式输送方式^[12-14]。现阶段，针对油菜薹收获机具的研究较少，上述蔬菜收获机难以满足油菜薹农艺及收获的要求。油菜为大田种植，常见轮式底盘在该工况下行走较为困难；油菜薹收获要求不影响下一茬出薹，收获机机架离地高度低，会对油菜割茬造成损伤；作业幅宽不能满足油菜薹收获时跨厢面行走的要求，可能造成不必要的碾压。

为实现油菜薹机械化收获的目标，减轻人工劳动强度、提高机具实用性和收获效率，设计一种自走式油菜薹收获机，基于动力学与运动学分析油菜薹收获切割、输送及收集过程，得出影响收获效率的主要因素，并基于此完成收获机关键装置的设计与参数分析，开展二次正交旋转台架试验，得出较优参数组合，通过田间试验验证参数组合的可靠性，并验证收获机的实际作业质量，为自走式油菜薹收获机结构设计及参数优化提供参考。

1 油菜薹种植农艺与生物学特性

1.1 油菜薹种植农艺

油菜薹为油菜抽薹期的产物，普遍为大田种植，由于种植地块较大，工况复杂且油菜为喜湿怕涝作物，而长江中下游地区降水量大，田间持水量高，容易形成水渍涝害，降低土壤通气性，进一步影响油菜

的生长发育，故需要开畦作沟。油菜薹种植农艺如图 1 所示。

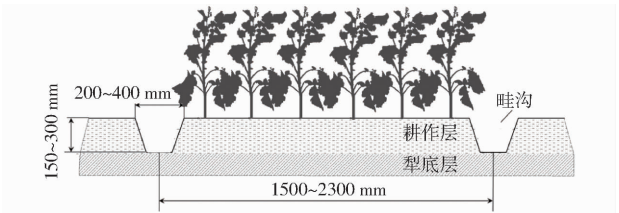


图 1 油菜薹种植农艺

Fig. 1 Cultivation agronomy of rapeseed stalks

油菜大多为机直播，平均种植密度为 38 株/m²，种植厢面宽度(两侧畦沟中心距离)为 1 500 ~ 2 300 mm，对于长江中下游冬油菜产区，畦沟深度与宽度一般为 150 ~ 300 mm 和 200 ~ 400 mm^[15]。

1.2 油菜薹生物学特性

测试品种为狮山菜薹 2017，种植于华中农业大学油菜薹试验基地，为获取油菜薹株高、不同部位直径、含水率等指标，随机抽取 120 株生长状态相似的油菜薹植株，其植株示意图如图 2 所示。测试结果为：在油菜薹适收期内(生长至 35 ~ 49 d^[16])，其株高主要分布在 500 ~ 600 mm 间，油菜薹收获留茬高度为 150 ~ 300 mm，切割处直径为 6.42 ~ 13.98 mm；单个薹质量分布在 400 ~ 500 g 间；油菜薹整株平均含水率为 90.77%，200 ~ 400 mm 处含水率均在 90% 以上，且变化范围较小，表明茎秆具有较强柔性，另一方面表明茎秆柔嫩易损，测试结果如表 1 所示。

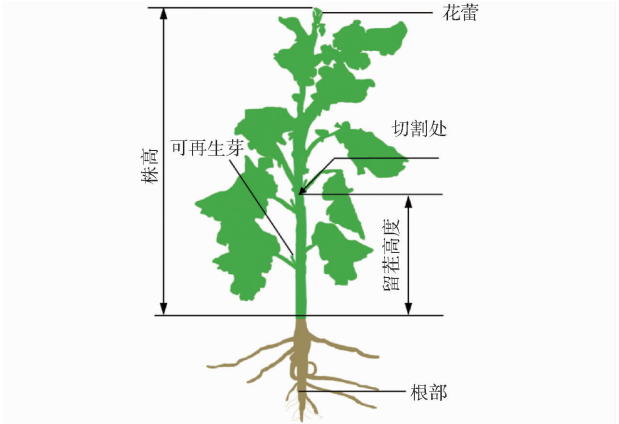


图 2 油菜薹植株示意图

Fig. 2 Schematic of rapeseed stalks plant

2 油菜薹收获机基本结构与工作过程

2.1 基本结构

自走式油菜薹收获机主要包括割台、割台升降系统、行走装置等，整机结构如图 3 所示。割台由切割装置、拨禾轮、输送装置组成。行走装置为机械式传动、柴油机驱动，底盘采用高地隙结构，底盘机架通过平行套管的方式实现底盘幅宽可调，可满足不

表 1 油菜薹生物学特性参数

Tab.1 Main technical parameters of rapeseed stalks										
指标	株高/ mm	分枝 数/ 个	最大 直径/ mm	200 ~	100 ~	整株 含水 率/%	200 ~	100 ~	含水 率/%	含水 率/%
				300 mm 直径/ mm	200 mm 直径/ mm		300 mm 直径/ mm	200 mm 直径/ mm		
最大值	716.20	10	17.42	13.04	13.98	91.56	91.96	89.53		
最小值	483.50	4	8.77	6.42	8.97	85.75	89.43	86.82		
平均值	539.20	8	12.17	9.34	10.67	90.77	91.56	91.06		
标准差	31.54	2.63	1.82	0.31	1.15	0.13	1.09	0.89		
变异系数	0.06	0.33	0.15	0.03	0.11	0.01	0.01	0.01		

同种植幅宽的油菜薹收获作业,同时可减少收获破损率及碾压率。

割台与割台双升降系统均为电控系统,如图 4 所示,直流电机调速器(CCM6DS 型,工作电压 DC 12 ~ 50 V,额定电流 30 A,适用功率 0.5 kW 以内)和推杆调速器(LX600 型电动推杆调速器,工作电压 DC 10 ~ 50 V,电流 40 A)调节电机转速,进而调节割刀线速度、拨禾轮转速、输送带线速度及倾斜升降

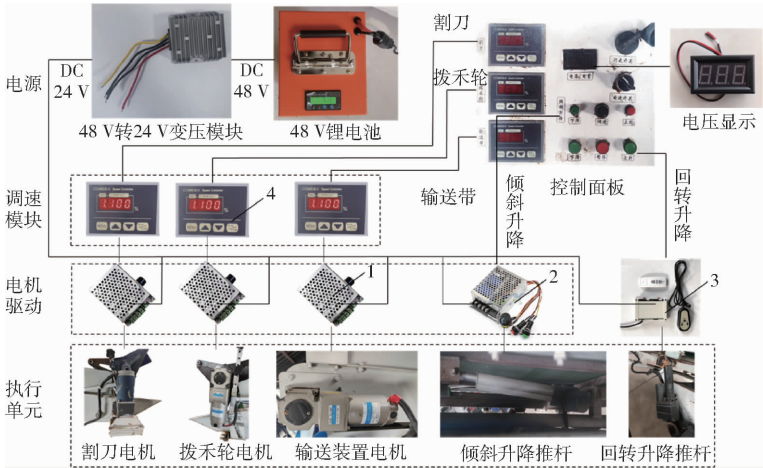


图 4 收获机电控系统

Fig.4 Harvesting electromechanical control system

1. 直流电机调速器 2. 推杆调速器 3. 同步器 4. 调速面板

行走系为高地隙履带底盘,对割茬损伤较小,不影响二次出薹,可进行二次或多次收获;收获机设置远程无线遥控功能,可通过观察油菜薹高度辅助遥控调节割台高度,也可进行割刀、拨禾轮及输送带的远程控制,包括启停和调速。整机主要技术参数如表 2 所示。

2.2 工作过程

收获机采用茎叶统收的工艺方案,工作流程如图 5 所示。田间作业时,割台双升降装置调节割台至合适高度,将各装置速度调至合适值,收获机跨厢面前进作业。主要过程如下:

(1)切割过程:分禾器将油菜薹向中间收拢,油菜薹经毛刷式拨禾轮引导扶持至往复式双动切割

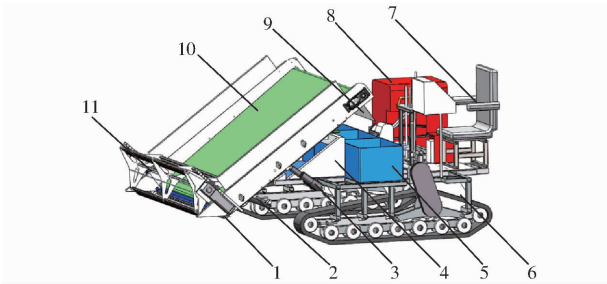


图 3 自走式油菜薹收获机结构简图

Fig.3 Structure diagram of self-propelled rapeseed stalks harvester

1. 切割装置 2. 割台双升降系统 3. 回转升降推杆 4. 底座
5. 收集箱 6. 行走装置 7. 操控台 8. 柴油机及其罩壳 9. 挡菜板 10. 输送装置 11. 拨禾轮

推杆(LX600 型电动推杆,工作电压 DC 24V,行程 300 mm)升降速度。回转升降采用同步器模块(LX700 型电动推杆同步控制器,工作电压 DC 12 ~ 24 V,电流 40 A)实现同步控制两侧回转升降推杆(LX700 型电动推杆,工作电压 DC 24 V,行程 100 mm),“倾斜升降+回转升降”构成割台双升降系统。



表 2 主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters	
参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 080×2 120×1 600
整机质量/kg	680
行走系统动力/kW	11
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.2~1.0
割幅/mm	1 800
留茬高度/mm	150~300
履带中心距调节范围/mm	1 500~2 300
底盘机架离地高度/mm	500
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.13~0.65

器,割刀将油菜薹茎秆切断。

(2)输送过程:拨禾轮及机组前进的推力将切

割后油菜薹推送至输送带前方,油菜薹在输送带上进行输送。

(3)收集过程:输送装置及时将油菜薹输送至收集箱,完成油菜薹持续收获过程。

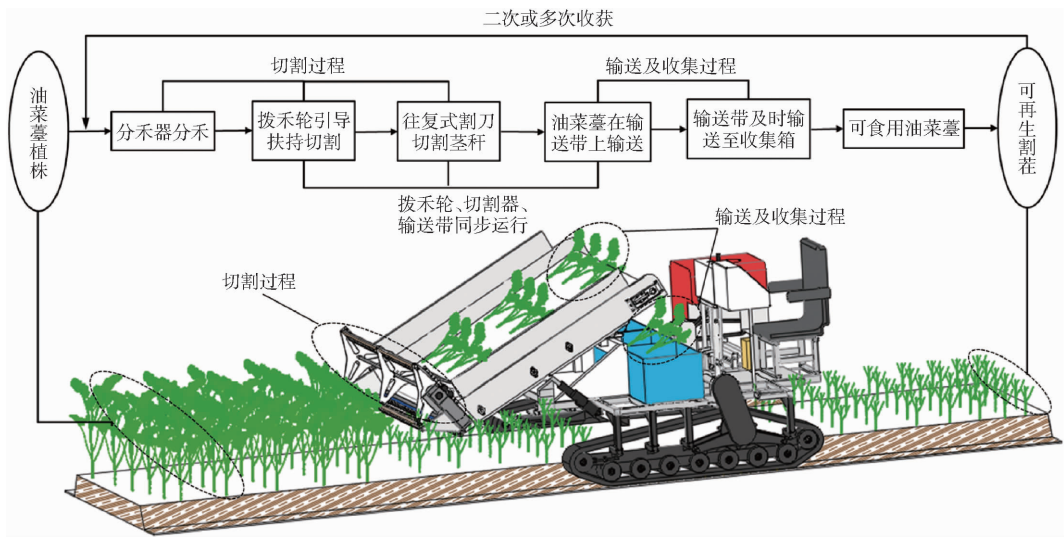


图 5 自走式油菜薹收获机工艺流程

Fig.5 Workflow of rapeseed stalks self-propelled harvester

3 油菜薹收获参数分析与关键部件设计

3.1 参数匹配设计与分析

基于收获机工艺方案及流程,油菜薹收获过程主要包括切割、输送及收集 3 个阶段。收获效率是机械化收获的重要内涵,减少不必要的时间可大大缩短收获时间,提高收获效率,故对单株油菜薹收获时长进行分析,得出影响收获效率的关键因素。

如图 6 所示,切割时,拨禾轮首先将油菜薹植株引导至切割器,往复切割器完成茎秆的切割作业。油菜薹切割过程所需时间 t_3 为

$$t_3 = t_1 + t_2 \quad (1)$$

其中 $t_1 = \frac{\alpha_1}{2\pi n_d R_b}$ $t_2 = \frac{D}{v_m}$

式中 α_1 ——油菜薹植株被切断前转动角度, ($^\circ$)

n_d ——拨禾轮转速, r/min

t_1 ——拨禾时间, s

t_2 ——割刀作用时间, s

R_b ——拨禾轮半径, m

D ——茎秆直径, m

v_m ——收获机前进速度, m/s

油菜薹茎秆经往复双动割刀切割后,油菜薹继续被拨禾轮作用至输送装置前端,进行输送作业。其输送过程主要包括两个运动:随收获机一同前进绕切割点 A 的定轴转动和落到输送带上随输送带的倾斜上升运动。油菜薹输送过程如图 7 所示。

油菜薹茎秆被割刀切下瞬间,在拨禾轮作业下具有水平向后的初速度 v_0 。假设植株与地面垂直,此时,植株在拨禾轮推力及重力作用下绕点 A 做定

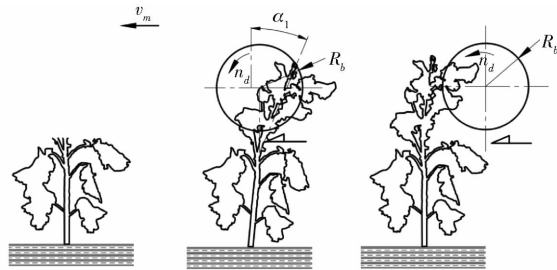


图 6 切割过程示意图

Fig.6 Diagram of cutting process

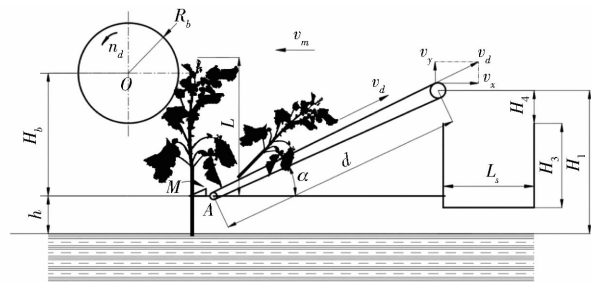


图 7 油菜薹植株输送过程

Fig.7 Transporting process of rapeseed stalks

轴转动。油菜薹绕点 A 做定轴转动的角速度 ω_b 为

$$\omega_b = \frac{v_0}{H_b - R_b} \quad (2)$$

其中 $v_0 = R_b \omega_b \sin(\omega_b t_1)$ $\omega_b = 2\pi n_d$

式中 H_b ——拨禾轮轴安装高度, m

ω_b ——拨禾轮转动角速度, rad/s

切割瞬间,油菜薹植株角加速度 a_2 计算式为

$$a_2 = \frac{M}{J} \quad (3)$$

其中

$$J = \frac{1}{3} mL^2$$

式中 J ——油菜薹做定轴转动的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

m ——植株质量, kg
 L ——收获植株长度, m
 M ——植株转矩, N·m

植株落到输送带上时定轴转动结束, 在时间 t_4 内有

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha = \omega t_4 + \frac{1}{2} a_2 t_4^2 \quad (4)$$

式中 θ ——自然生长状态下植株与输送带夹角, ($^\circ$)

α ——输送带倾斜角, ($^\circ$)

油菜薹植株随输送带向上做直线运动的时间 t_5 为

$$t_5 = \frac{d}{v_d} \quad (5)$$

式中 d ——输送带长度, m
 v_d ——输送带线速度, m/s

为保证输送过程顺利, 输送带线速度与收获机前进速度的比值计算式为

$$k = \frac{v_d}{v_m} = \frac{\pi r n_2}{30 v_m} \quad (6)$$

式中 r ——主动滚筒半径, m
 n_2 ——主动滚筒转速, r/min

k 一般取 1.4 ~ 1.6, 为减少输送过程中油菜薹损伤, 输送带速度不宜过大, 综合考虑, 本文取 1.4^[17-18]。

输送完成后, 油菜薹做斜抛运动, 进行收集过程。由于输送带摩擦因数较大, 假设油菜薹到达输送带终点速度与输送带线速度相等, 油菜薹做斜抛运动时向上运动时间 t_6 为

$$t_6 = \frac{v_y}{g} = \frac{v_d \sin \alpha}{g} \quad (7)$$

式中 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²
 v_y ——输送带在 y 轴的分速度, m/s

当油菜薹竖直分速度为 0 时, 油菜薹做自由落体运动落入收集箱所用时间 t_7 为

$$t_7 = \sqrt{\frac{2(H_3 + H_4 + H_5)}{g}} \quad (8)$$

其中 $H_5 = v_y t_6 - \frac{1}{2} g t_6^2$
 $t_6 = \frac{S_1}{v_x}$

式中 H_5 ——斜抛运动高度, m
 v_x ——输送带在 x 轴的分速度, m/s
 S_1 ——斜抛运动水平位移, m
 H_3 ——收集箱高度, m
 H_4 ——输送带与收集箱垂直距离, m

为避免油菜薹落入收集箱外部, 收集箱宽度 L_s

应大于油菜薹斜抛时水平位移, 即

$$L_s > \frac{v_m^2 k^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} \quad (9)$$

故油菜薹收获作业所需总时间 t_8 为

$$t_8 = \frac{\alpha_1}{2\pi n_d R_b} + \frac{D}{v_m} + \frac{d}{v_m k} + \frac{v_m k \sin \alpha + \sqrt{2g(H_3 + H_4) + (v_m k \sin \alpha)^2}}{g} + \frac{-mL^2 \frac{2\pi R_b n_b \sin \alpha_1}{H_b - R_b} + \sqrt{\left(\frac{2\pi R_b n_b \sin \alpha_1}{H_b - R_b}\right)^2 m^2 L^4 + 3MmL^2 \theta}}{3M} \quad (10)$$

由式(10)可知, 影响输送效率的因素主要包括拨禾轮半径、拨禾轮安装高度、前进速度、拨禾轮转速、输送带倾斜角等。其中, 切割过程由切割器及拨禾轮共同完成, 输送装置实现油菜薹输送过程, 同时输送装置倾斜角依靠升降装置进行调节, 油菜薹收获应减少不必要的损失, 保证收获效果。对各装置结构及相关参数进行设计与分析, 以满足油菜薹收获要求, 提高收获效率。

3.2 切割装置设计与分析

切割过程是收获过程第 1 阶段, 割刀与拨禾轮配合完成油菜薹茎秆切割, 采用往复式双动切割器, 收获时较为平稳、振动小^[19-20], 可减少油菜薹的损伤。动刀片采用光刃结构; 传动机构采用双偏心轮机构, 偏心距为割刀行程的一半, 即 15 mm。上下偏心轮相位相差 180°, 对称布置。作业时, 上下偏心轮分别带动上下两组刀片, 双偏心轮的圆周运动转换为上下刀片的直线往复运动。同时, 上下偏心轮相位差为 180° 保证上下动刀始终做反向运动。传动机构如图 8 所示。

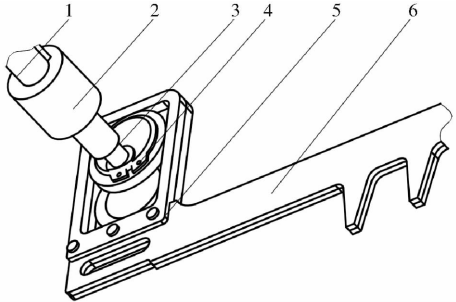


图 8 传动机构

Fig. 8 Transmission mechanism

1. 动力输入轴 2. 联轴器 3. 双偏心轮 4. 轴用挡圈 5. 割刀箱盖 6. 动刀片

3.2.1 割刀偏心轮转速

割刀在一个行程中, 其切割阻力随着切割线速度的增大而减小, 但割刀速度增大同样会导致加速度即惯性力增大, 振动也随之增加, 因此需合理设置

偏心轮的转速。往复式双动割刀偏心轮转速 n 为

$$n = \frac{15v_p}{r_1} \tag{11}$$

式中 r_1 ——偏心轮半径, m
 v_p ——往复式割刀平均线速度, m/s

由试验可得, 当割刀平均线速度大于 0.3 m/s 时, 可顺利完成蔬菜茎秆的切割, 但速度过大会引起较大振动, 导致切割不平稳, 取割刀平均速度为 0.3 ~ 1.0 m/s, 经式 (11) 计算确定偏心轮转速为 200 ~ 1 000 r/min。

3.2.2 动刀片滑切角

切割器对茎秆进行切割时, 当油菜薹茎秆未被上下动刀稳定夹持时^[21], 茎秆沿割刀滑移, 导致漏割或割茬不整齐。为减少上述现象, 对茎秆剪切过程进行分析^[22]。

当油菜薹茎秆刚接触到割刀时, 茎秆还未被割刀夹持, 茎秆主要受到上下动刀对茎秆的摩擦合力 F_1 、前进时的推力 F_T 及根部对茎秆的拉力 F_2 , 受力如图 9a 所示。不发生漏割的条件为

$$F_T \sin \beta_1 + F_2 \geq F_1 \tag{12}$$

式中 β_1 ——割刀与水平面夹角, ($^\circ$)
即前进推力的竖直分力与根部拉力之和应大于等于摩擦合力, 否则会出现茎秆沿割刀滑移的现象, 导致漏割。

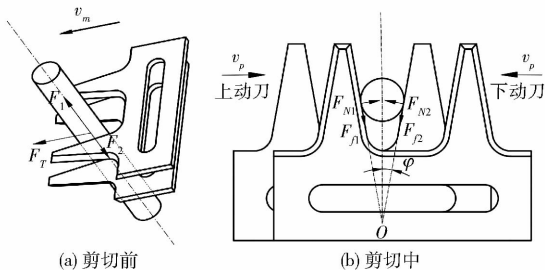


图 9 剪切过程受力分析

Fig. 9 Shear forces

当上下动刀开始对茎秆进行剪切时, 油菜薹茎秆主要受割刀对茎秆的支持力 F_N 及割刀对茎秆的摩擦力 F_f 。茎秆剪切过程受力分析如图 9b 所示, 由图 9b 可得

$$\begin{cases} (F_{N1} + F_{N2}) \sin \varphi \leq (F_{f1} + F_{f2}) \cos \varphi \\ F_{N1} = F_{N2} \\ F_{f1} = F_{f2} = \mu_1 F_{N1} = \tan \beta_2 F_{N1} \end{cases} \tag{13}$$

式中 F_{N1} ——上割刀对茎秆的支持力, N
 F_{N2} ——下割刀对茎秆的支持力, N
 F_{f1} ——上割刀对茎秆的摩擦力, N
 F_{f2} ——下割刀对茎秆的摩擦力, N
 φ ——滑切角, ($^\circ$)
 μ_1 ——摩擦因数

β_2 ——摩擦角, ($^\circ$)

经计算, 满足油菜薹茎秆不沿割刀滑移的条件为

$$\varphi \leq \beta_2 \tag{14}$$

即滑切角需小于等于割刀与油菜薹茎秆间的摩擦角。割刀与茎秆间摩擦因数一般不超过 0.6^[23], 对应摩擦角为 30.96 $^\circ$, 滑切角应小于该值, 本文取 20 $^\circ$ 。

3.2.3 拨禾轮关键参数及运动轨迹分析

拨禾轮主要作用为将待切割的油菜薹引导至切割器, 便于割刀的切割作业, 并将切断的油菜薹向后推送, 避免油菜薹在割刀上造成堵刀^[24-27]。偏心结构对油菜薹打击较轻, 且对于倒伏油菜薹有较好的适应能力, 为进一步减少油菜薹茎叶损伤, 拨板上增加柔性装置软毛刷, 其结构如图 10 所示, 主要由中心轴、偏心轮、毛刷拨板等部件组成。

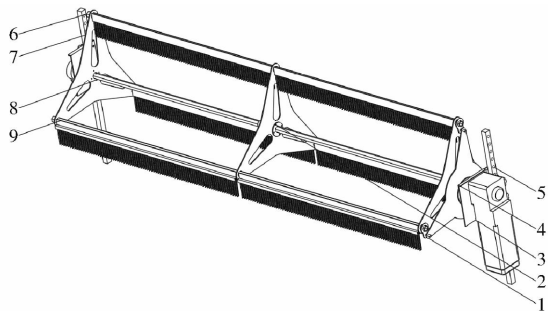


图 10 拨禾轮结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of rotary wheel

1. 偏心轮 2. 轴套 3. 直流电机 4. 连接板 5. 高度调节杆
6. 拨杆 7. 拨禾轮 8. 中心轴 9. 毛刷拨板

油菜薹柔嫩易损, 作业时, 毛刷拨板插入植株时应尽量与地面保持垂直, 即垂直入禾。本文所设计的偏心拨禾轮由 3 组曲柄四连杆机构组成, 如图 11 所示, 工作时, 偏心圆环绕中心轴转动, 毛刷拨板与水平地面呈 90 $^\circ$, 此时, OO_1 位置固定, 电机带动拨禾轮转动时, 曲柄 Bb 始终与 OO_1 平行, 拨禾轮作业时毛刷拨板始终保持垂直插入油菜薹植株, 降低对油菜薹的冲击。拨板垂直入禾时, 为使切割后的植株顺利被提送至输送装置, 其最低点应作用在油菜薹茎秆切断部分重心略上方位置, 切断部分重心到茎秆顶端距离 c 满足^[17]

$$c = \frac{1}{3}(L_y - h) \tag{15}$$

式中 L_y ——油菜薹植株平均高度, 取 540 mm
 h ——割茬平均高度, 取 150 ~ 300 mm

拨禾轮半径 R_b 计算式为

$$R_b = \frac{R_b}{\lambda} + c \tag{16}$$

式中 λ ——拨禾速比, 为 2

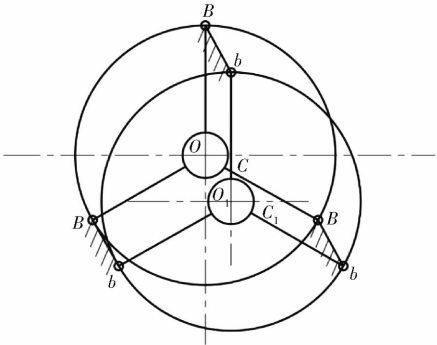


图 11 拨禾轮结构简图

Fig. 11 Structure diagram of rotary wheel

代入数据得拨禾轮半径为 93.4 ~ 260.0 mm,设计时取最大值 260 mm。

安装高度 H_b (距离割刀) 计算式为

$$H_b = R_b + 2c \tag{17}$$

计算得拨禾轮轴安装高度为 353.4 ~ 520.0 mm,鉴于植株生长高度不一,设计时取可调高度为 300 ~ 550 mm。

收获机多采用偏心五杆机构拨禾轮^[28],油菜薹生物量大,分枝多,收获时容易产生回带现象^[29-30],为避免上述现象,拨禾轮拨板数取 3。

拨禾轮运动可从拨板上一点的运动进行分析,其为绕中心轴的定轴转动与随收获机一起做前进运动的合成运动,其运动方程为

$$\begin{cases} x = v_m t + R_b \cos(\omega_b t) \\ y = H_b + h - R_b \sin(\omega_b t) \end{cases} \tag{18}$$

式中 x ——拨板上任一点水平坐标

y ——拨板上任一点竖直坐标

由式(18)可知,拨板上任一点的运动轨迹为余摆线。拨禾速比为拨禾轮线速度与机组前进速度的比值,在一定程度上决定了拨禾轮运动轨迹。

由图 12 可知,只有当 $\lambda > 1$ 时,其轨迹为一余摆线,可形成连续扣环,其速度分析如图 13 所示,拨板具有水平向后的分速度,且向后推送效果明显。拨禾速比 λ 与拨板数 n_b 、前进速度 v_m 以及收获对象有关。油菜薹收获时, v_m 不超过 1 m/s,且拨板数为 3, λ 应稍取大些,但速比过大会造成拨禾轮转速过高,对油菜薹的打击也会随之增加,综合考虑,拨禾速比 λ 取 2,转速为 14.70 ~ 73.49 r/min。

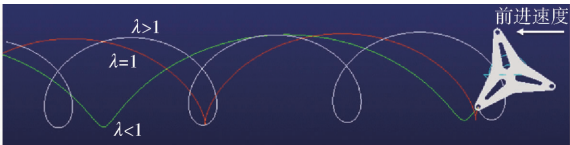


图 12 不同 λ 时拨禾轮末端运动轨迹

Fig. 12 Trajectory of end of rotary wheel at different λ values

3.3 倾斜输送带设计

油菜薹茎秆被切割后,输送装置完成油菜薹输

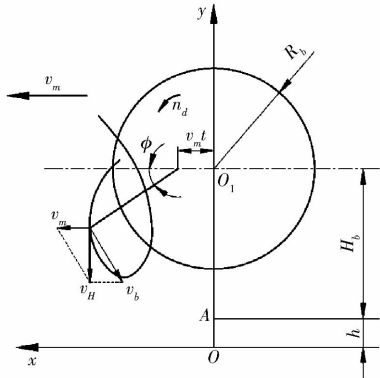


图 13 拨禾轮运动轨迹

Fig. 13 Track of rotary wheel

送过程。采用带式倾斜输送装置,主要包括输送带、主从动滚筒、侧板、直流电机等,如图 14 所示。为增加输送过程稳定性,增加托辊和定距杆,且便于安装。工作时,直流电机带动主动滚筒做圆周运动,进而带动输送带、从动滚筒及托辊运动,完成输送作业。

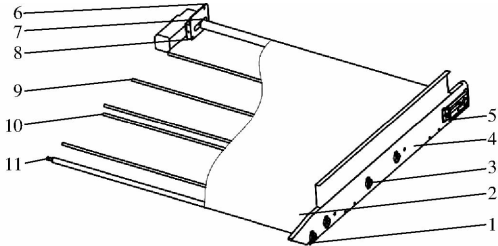


图 14 输送装置结构示意图

Fig. 14 Conveying device structure diagram

- 1. 分禾器 2. 输送带 3. 菱形轴承座 4. 侧板 5. 左侧张紧装置 6. 右侧张紧装置 7. 主动滚筒 8. 直流电机 9. 托辊 10. 定距杆 11. 从动滚筒

输送带为 PVC 材质,周长为 3 380 mm,宽度为 1 780 mm。输送带花纹类型的选取主要取决于植株与输送带材料间的滑动摩擦角,通过测量油菜薹与不同接触表面间滑动摩擦角,选择合适花纹类型。接触面选择使用广泛的两种花纹类型:菱形花纹和草坪花纹。测试过程如图 15 所示。

试验时,将油菜薹按铺放角度与水平面依次呈 0°、30°、45°、60°、90° 的顺序进行测试,分析不同铺放角度对静滑动摩擦角的影响。将油菜薹植株放置于输送带表面,缓慢增大测试仪角度,当样本刚开始下滑时停止,调节水平尺直至水准管中气泡位于管体中间,读取该状态下的角度,即为静滑动摩擦角,试验测试 5 组,取平均值。试验结果如图 16 所示,结果表明:油菜薹在两种花纹输送带上不产生滑落的最小静滑动摩擦角分别为 36.2° 和 31.4°,输送过程需尽可能避免滑落,优先选用静滑动摩擦角较大的草坪花纹输送带,割台最大倾角应小于 36.2°。

主动滚筒用于支撑输送带并传递动力和运动,



图15 静滑动摩擦角试验

Fig. 15 Test of static sliding friction angle

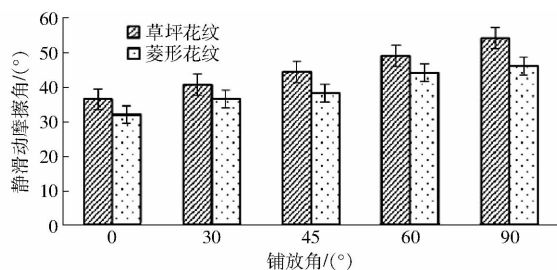


图16 静滑动摩擦角测试结果

Fig. 16 Test results of static sliding friction angle

考虑到割台空间约束,直径为60 mm,滚筒表面增加滚花以增大输送带与轴间摩擦力,防止作业时打滑。根据式(6)计算可得主动滚筒转速为44.6 ~ 223.0 r/min,输送带线速度为0.28 ~ 1.40 m/s。

油菜薹切割后由输送装置及时将切断部分输送至收集装置,避免造成堆积,采用收集箱进行收集作业。由式(6) ~ (9)可得,油菜薹斜抛水平位移为 $1.3 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ m,收集箱宽度为0.4 m,远大于水平位移,油菜薹不会被抛出收集箱外。

3.4 割台双升降系统设计

输送装置倾斜角度由升降系统进行调节,同时升降系统还用于割台高度的调节,最大限度满足油菜薹收获长度一致性。割台双升降系统采用“回转升降+倾斜升降”的方式,其结构如图17所示。输送带侧板连接架用于连接割台,倾斜升降装置为一对滑轨固定在机架上,通过推杆作用,侧板连接架上下滑动,调节割台高度;回转升降推杆直接作用于升降机架,带动回转升降主轴回转实现高度调节。

根据油菜薹植株高度与收获长度,设置割台调节高度为150 ~ 600 mm,通过参考升降机架尺寸,确

定倾斜升降推杆行程为300 mm,回转升降推杆行程为100 mm,图18为升降装置几何位置图。

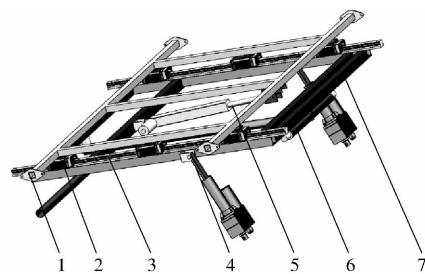


图17 升降装置结构示意图

Fig. 17 Schematic of lifting device structure

1. 输送带侧板连接架 2. 滑块 3. 滑轨 4. 回转升降推杆
5. 倾斜升降推杆 6. 回转升降转轴 7. 升降机架

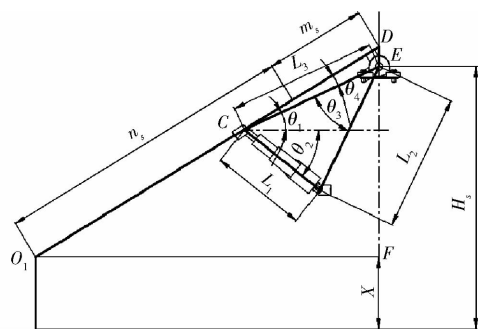


图18 升降装置几何位置关系图

Fig. 18 Geometric position diagram of lifting device

为简化运算,对回转升降推杆上铰链点C进行定位,计算式为

$$\begin{cases} X_{\min} = H_s + L_{DE} - (m_s + n_s) \sin(\theta_{1\max} + \theta_4) \\ X_{\max} = H_s + L_{DE} - n_s \sin(\theta_{1\min} + \theta_4) \\ \cos\theta_4 = \frac{L_3^2 + L_{CD}^2 - L_{DE}^2}{2L_3 L_{CD}} \end{cases} \quad (19)$$

式中 X ——割台调节高度,mm

L_{DE} ——回转主轴心点E与点D间距离,mm

L_{CD} ——上铰链点C与点D间距离,mm

θ_1 ——回转升降转轴与水平面间夹角, (°)

θ_4 ——倾斜升降推杆与回转升降推杆间夹角, (°)

L_3 ——转轴与推杆上铰链支座间距离,mm

H_s ——回转升降主轴高度,mm

m_s ——倾斜升降推杆行程,取300 mm

n_s ——倾斜升降上滑块与割刀之间距离,mm

为提高推杆推力的利用效率,应使推杆在行程范围内,尽可能地与 DO_1 垂直,即推杆在最大推程和最小推程时, $\theta_1 + \theta_2$ 最小值和最大值以 90° 为中心,有

$$\theta_1 + \theta_2 = 90 \pm \frac{\theta_{1\max} - \theta_{1\min}}{2} \quad (20)$$

式中 θ_2 ——回转升降推杆与水平面间夹角, (°)

当 L_1 取最小值时,求得 L_2 , 即推杆安装位置

$$\begin{cases} \cos\left(90 - \frac{\theta_{1\max} - \theta_{1\min}}{2}\right) = \frac{L_1^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_1L_3} \\ L_2 = \sqrt{2L_1L_3\cos\left(90 - \frac{\theta_{1\max} - \theta_{1\min}}{2}\right) - L_1^2 - L_3^2} \end{cases} \quad (21)$$

式中 L_1 ——回转升降推杆上下铰链支座间距离，取 350 ~ 450 mm
 L_2 ——转轴与推杆下铰链支座间距离，mm
计算得 L_2 为 327.5 mm，此时割台倾角调节范围为 16.4° ~ 32.6°。

4 二次回归正交旋转台架试验

4.1 试验材料与方法

试验在华中农业大学现代农业试验基地进行，试验品种为狮山菜薹 2017，选择 120 株油菜薹植株，各株油菜薹长势粗细大致相同。试验台架主要由收获机、输送链、夹持装置等组成，其结构如图 19 所示。试验时，使自走式油菜薹收获机履带前端距离台架后端 500 mm，油菜薹植株固定在夹持装置上，通过调节电机带动链条上的油菜薹向前运动，输送链条线速度表示收获机前进速度，当其运行至收获机收获部分时，依次完成油菜薹切割、输送及收集作业。



图 19 台架试验平台

Fig. 19 Bench test platform

1. 收获机 2. 输送链轮 3. 夹持装置 4. 输送链条 5. 张紧装置

4.2 试验因素与指标

为获得最佳收获效果时的作业参数组合，以收获机前进速度、切割线速度、输送带线速度及拨禾轮转速为主要影响因素，开展二次回归正交旋转台架试验，每组试验重复 3 次，取其平均值。试验因素与编码见表 3^[31]。

表 3 试验因素编码

编码	因素			
	前进速度	切割线速度	输送带线速度	拨禾轮转速
	$A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$D/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
-1	0.4	0.3	0.4	40
0	0.6	0.5	0.8	50
1	0.8	0.7	1.2	60

收获效果以漏割率 Y_D 、输送失败率 Y_S 及茎叶破损度 Y_W 进行综合测评，综合评分 Y 计算式为

$$Y = 0.4Y_D + 0.2Y_S + 0.4Y_W \quad (22)$$

其中
$$Y_D = \frac{N_n}{N_n + N_y} \times 100\% \quad (23)$$

$$Y_S = \frac{m_a}{m_a + m_b} \times 100\% \quad (24)$$

$$Y_W = \frac{m_n}{m_n + m_y} \times 100\% \quad (25)$$

式中 N_y ——切割成功的油菜薹植株数量
 N_n ——漏割油菜薹植株数量
 m_b ——输送到收集箱中油菜薹质量，g
 m_a ——输送失败油菜薹质量，g
 m_y ——完整茎叶质量，g
 m_n ——破损茎叶质量（茎秆扯皮、叶片受损面积大于 10%），g

综合评分越小收获效果越好。

4.3 试验结果与分析

试验结果如表 4 所示， X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。

表 4 试验结果
Tab. 4 Test results

编号	因素				$Y_D/\%$	$Y_S/\%$	$Y_W/\%$	$Y/\%$
	X_1	X_2	X_3	X_4				
1	-1	-1	0	0	6.67	4.33	7.14	6.39
2	1	-1	0	0	8.33	5.26	6.34	6.92
3	-1	1	0	0	5.00	4.61	8.47	6.31
4	1	1	0	0	6.67	5.33	9.49	7.53
5	0	0	-1	-1	4.17	6.16	8.70	6.38
6	0	0	1	-1	5.00	6.38	5.41	5.44
7	0	0	-1	1	5.00	5.67	6.27	5.64
8	0	0	1	1	5.00	6.26	9.75	7.15
9	-1	0	0	-1	4.17	6.92	8.15	6.31
10	1	0	0	-1	5.83	5.32	7.06	6.22
11	-1	0	0	1	5.00	5.31	6.42	5.63
12	1	0	0	1	5.83	5.91	10.14	7.57
13	0	0	-1	0	4.17	5.11	9.40	6.45
14	0	1	-1	0	5.00	4.81	6.87	5.71
15	0	-1	1	0	5.83	4.96	6.47	5.91
16	0	1	1	0	4.17	4.72	10.67	6.87
17	-1	0	-1	0	5.83	5.12	6.59	5.99
18	1	0	-1	0	5.83	4.91	7.04	6.13
19	-1	0	1	0	5.00	5.09	6.11	5.46
20	1	0	1	0	6.67	5.62	8.75	7.29
21	0	-1	0	-1	5.83	6.51	7.37	6.58
22	0	1	0	-1	4.17	6.62	6.57	5.62
23	0	-1	0	1	5.83	4.87	5.84	5.64
24	0	1	0	1	4.17	5.12	11.05	7.11
25	0	0	0	0	4.17	3.66	5.80	4.72
26	0	0	0	0	5.00	3.42	5.12	4.73
27	0	0	0	0	3.33	3.92	6.86	4.86
28	0	0	0	0	4.17	3.81	5.63	4.68
29	0	0	0	0	3.33	4.37	7.01	5.01

利用 Design-Expert 8.0.6 对试验结果进行方差分析,结果如表 5 所示。据表 5 可知,油菜薹收获效果综合评分 Y 的 $P < 0.001$,表明回归模型影响极显著,拟合度较高;综合评分回归模型中失拟项 $P > 0.05$,失拟项影响不显著,决定系数 R^2 为 0.982 3,表明 98.23% 的响应值可由收获效果综合评分回归模型解释^[32],进一步表明回归模型拟合度较好,可以作为收获机工作参数的预测结果。

表 5 方差分析
Tab.5 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	19.70	14	1.41	55.52	<0.000 1
<i>A</i>	2.59	1	2.59	102.00	<0.000 1
<i>B</i>	0.13	1	0.13	5.22	0.038 5
<i>C</i>	0.28	1	0.28	10.89	0.005 3
<i>D</i>	0.40	1	0.40	15.77	0.001 4
<i>AB</i>	0.12	1	0.12	4.70	0.048 0
<i>AC</i>	0.71	1	0.71	28.17	0.000 1
<i>AD</i>	1.03	1	1.03	40.64	<0.000 1
<i>BC</i>	0.72	1	0.72	28.50	0.000 1
<i>BD</i>	1.48	1	1.48	58.24	<0.000 1
<i>CD</i>	1.50	1	1.50	59.20	<0.000 1
<i>A</i> ²	6.17	1	6.17	243.27	<0.000 1
<i>B</i> ²	5.09	1	5.09	201.00	<0.000 1
<i>C</i> ²	2.03	1	2.03	79.89	<0.000 1
<i>D</i> ²	2.89	1	2.89	114.02	<0.000 1
残差	0.35	14	0.025		
失拟	0.28	10	0.028	1.53	0.361 5
误差	0.073	4	0.018		
总和	20.06	28			

轮转速的 P 均小于 0.05,表明收获效果综合评分受 4 个因素影响较为显著。根据各因素回归系数得出各因素对综合评分的影响由大到小为:前进速度、拨禾轮转速、输送带线速度、切割线速度,对所得数据进行拟合,得到各因素对综合评分的回归模型为

$$Y=62.450\,73-45.997\,92A-43.656\,25B-18.689\,58C-1.075\,88D+4.312\,50AB+5.281\,25AC+0.253\,75AD+5.312\,50BC+0.303\,75BD+0.153\,13CD+24.375\,00A^2+22.156\,25B^2+3.492\,19C^2+6.675\,00\times10^{-3}D^2$$

由表 5 可知,各因素间存在明显的交互作用,为探究其对综合评分的影响,对试验数据进一步处理,得到各因素交互作用的响应曲面如图 20 所示。

图 20a 中,当前进速度为 0.45~0.65 m/s,切割线速度为 0.40~0.60 m/s 时,收获效果较好;图 20b 中,当前进速度为 0.45~0.65 m/s,输送带线速度为 0.50~1.00 m/s 时,收获效果较好;图 20c 中,当前进速度为 0.45~0.65 m/s,拨禾轮转速为 43~56 r/min 时,收获效果较好;图 20d 中,当切割线速度为 0.40~0.60 m/s,输送带线速度为 0.50~1.00 m/s 时,收获效果较好;图 20e 中,当切割线速度为 0.40~0.60 m/s,拨禾轮转速为 43~56 r/min 时,收获效果较好;图 20f 中,当输送带线速度为 0.50~1.00 m/s,拨禾轮转速为 43~56 r/min 时,收获效果较好。

以综合评分最低为求解条件,运用 Design-Expert 8.0.6 求解得到最优参数组合为:前进速度 0.56 m/s、切割线速度 0.50 m/s、输送带线速度

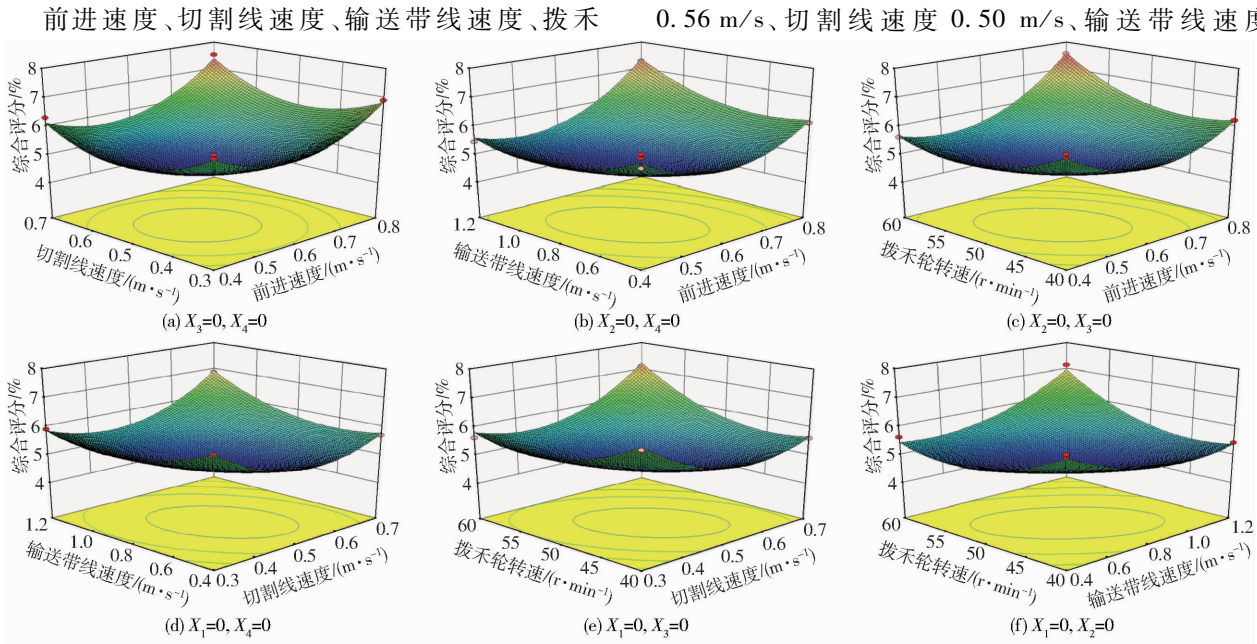


图 20 交互作用响应曲面
Fig. 20 Interaction response surfaces

0.79 m/s、拨禾轮转速 49.70 r/min 时,油菜薹收获效果最佳,综合评分为 4.74%。

4.4 田间试验验证

为验证所求解的最优组合参数的可靠性,在最优参数条件下(拨禾轮转速取 50 r/min),在华中农业大学油菜薹种植基地开展自走式油菜薹收获机田间试验。试验作业工况为:平均土壤含水率为 19.5%,平均土壤坚实度为 3 537.10 kPa,田间试验如图 21 所示。

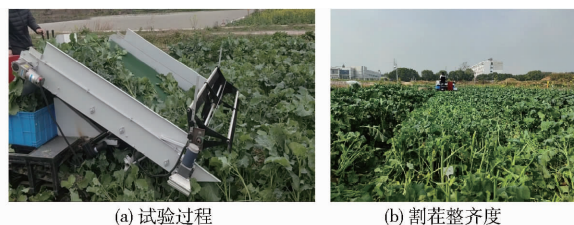


图 21 田间试验

Fig. 21 Field experiments

试验结果表明:自走式油菜薹收获机收获时作业顺畅,两侧履带可实现在畦沟中行走,收获后割茬破损较小,不影响二次出薹,可满足油菜薹收获要求。

收获机作业后油菜薹植株割茬整齐,油菜薹漏割率为 4.28%,输送失败率为 3.42%,茎叶破损率为 6.39%,收获机作业效率为 0.36 hm²/h,可满足油菜薹收获实际生产需求。

5 结论

(1)基于油菜薹生物学特性与农艺要求,设计了一种自走式油菜薹收获机,主要包括行走、切割、拨禾、输送、升降等装置。可实现自走、自动升降、茎叶统收,一次性完成油菜薹切割、输送与收集作业工序。有利于减轻劳动强度,提高收获效率。

(2)对油菜薹收获切割、输送及收集过程进行了动力学与运动学分析,得出影响收获效率的主要因素有拨禾轮半径、拨禾轮转速、输送带线速度、输送装置倾斜角等,并基于此开展了关键部件的结构设计与参数分析,得出拨禾轮半径为 260 mm、转速为 14.70 ~ 73.49 r/min、输送带线速度为 0.28 ~ 1.40 m/s、输送装置倾角范围为 16.4° ~ 32.6°。

(3)利用二次回归正交旋转试验进行分析,得出各因素对综合评分的影响由大到小为:前进速度、拨禾轮转速、输送带线速度、切割线速度,最优参数组合:前进速度 0.56 m/s、切割线速度 0.50 m/s、输送带线速度 0.79 m/s、拨禾轮转速 49.70 r/min 时油菜薹收获效果最佳。

(4)田间试验验证最佳组合参数,结果表明:收获机作业后油菜薹植株割茬整齐,收获机作业效率为 0.36 hm²/h;在最佳参数组合下,油菜薹漏割率为 4.28%,输送失败率为 3.42%,茎叶破损率为 6.39%,可满足油菜薹收获实际生产需求。

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, 2018,40(5):618-623. (in Chinese)
- [2] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):24-44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2):24-44. (in Chinese)
- [3] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):1-16. (in Chinese)
- [4] 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. Current status and development of stem and leaf vegetable mechanized harvesting technology[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4):117-127. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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 carrot harvester root and stem separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):82-89. (in Chinese)
- [7] 杜冬冬,费国强,王俊,等. 自走式甘蓝收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):16-22.
DU Dongdong, FEI Guoqiang, WANG Jun, et al. Development and experiment of self-propelled cabbage harvester[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(14):16-22. (in Chinese)

- [8] 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)
- [9] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 多功能根茎类作物联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):58-61.
HU Zhichao, PENG Baoliang, YIN Wenqing, et al. Design and experiment of multifunctional combined harvester for root and stem crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8):58-61. (in Chinese)
- [10] 王金武,关睿,高鹏翔,等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):73-81.
WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):73-81. (in Chinese)
- [11] 邢立冉,李汝苾,王铁新,等. 分置式大蒜收获机设计与仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):137-140,111.
XING Liran, LI Ruxin, WANG Tiexin, et al. Design and analysis of split garlic harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):137-140,111. (in Chinese)
- [12] 廖凯,古全元,高自成,等. 芦苇笋采收机研制[J]. 农业工程学报,2021,37(15):20-30.
LIAO Kai, GU Quanyuan, GAO Zicheng, et al. Development of reed shoot harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15):20-30. (in Chinese)
- [13] 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(Supp. 2):162-169,190. (in Chinese)
- [14] 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. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):72-79. (in Chinese)
- [15] 张青松,廖庆喜,肖文立,等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):702-711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018,40(5):702-711. (in Chinese)
- [16] 马朝芝,文静,易斌,等. 菜用甘蓝型油菜品种狮山菜薹的选育[J]. 长江蔬菜,2019(8):31-34.
MA Chaozhi, WEN Jing, YI Bin, et al. Breeding of Shishancaitai, a new rape(*Brassica napus* L.) cultivar[J]. Changjiang Vegetables, 2019(8):31-34. (in Chinese)
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [18] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):109-121.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground clearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):109-121. (in Chinese)
- [19] 关卓怀,吴崇友,王刚,等. 油菜联合收割机双向电驱动分行竖割刀设计[J]. 农业工程学报,2019,35(2):1-6.
GUAN Zhuohuai, WU Chongyou, WANG Gang, et al. Design of bidirectional electric drive branch vertical cutter for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(2):1-6. (in Chinese)
- [20] 冉军辉,沐森林,李海同,等. 油菜联合收获机往复式双动割刀行星轮驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(9):18-22.
RAN Junhui, MU Senlin, LI Haitong, et al. Design and experiment of reciprocating double cutter planetary wheel driver for rape combined harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(9):18-22. (in Chinese)
- [21] 施印炎,陈满,汪小昆,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):110-116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):110-116. (in Chinese)
- [22] 张佳喜,黄涛,王茂博. 单马达往复式葡萄剪枝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):107-114.
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):107-114. (in Chinese)
- [23] 杜哲. 茶茎秆仿生割刀设计及切割性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
DU Zhe. Research on biomimetic design of cutting blade for tea stem and its cutting performance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2020. (in Chinese)
- [24] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [25] 杨毅,李耀明,青苁任. 油菜联合收获机拨禾轮的入禾轨迹分析与试验[J]. 农机化研究,2020,42(10):189-194.
YANG Yi, LI Yaoming, QING Yiren. Insertion trajectory analysis and experiment of rape combine harvester reel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(10):189-194. (in Chinese)
- [26] 廖庆喜. 油菜生产机械化技术[M]. 北京:科学出版社,2018.

[27] 王进华,王泽群,贾晶霞,等. 饲料收获机矮秆割台拨禾轮导轨运动轨迹研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):152-155.
WANG Jinhua, WANG Zequn, JIA Jingxia, et al. Guide rail trajectory of mower table reel device for silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):152-155. (in Chinese)

[28] 刘巍,黄小毛,马丽娜,等. 油葵联合收获机专用割台设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):83-88,135.
LIU Wei, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and experiment of special header of oil sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):83-88,135. (in Chinese)

[29] 李海同,吴崇友,沐森林,等. 基于 ANSYS-ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报,2020,36(14):96-105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(14):96-105. (in Chinese)

[30] 吴崇友,王积军,廖庆喜,等. 油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):124-131.
WU Chongyou, WANG Jijun, LIAO Qingxi, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(1):124-131. (in Chinese)

[31] 丁宁,李海涛,闫安,等. 秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):196-202,290.
DING Ning, LI Haitao, YAN An, et al. Optimization and experiment on straw multi-stage continuous cold roll forming for molding parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 196-202,290. (in Chinese)

[32] 王伯凯,张鹏,曹明珠,等. 花生捡拾收获机秧蔓输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):126-137.
WANG Bokai, ZHANG Peng, CAO Mingzhu, et al. Design and experiment of pneumatic conveying device for seedlings of peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):126-137. (in Chinese)

(上接第 105 页)

[26] 王永维,何焯亮,王俊,等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机植苗性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3):19-25.
WANG Yongwei, HE Zhuoliang, WANG Jun, et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):19-25. (in Chinese)

[27] 尹大庆,张诺一,周脉乐,等. 高速变姿态接苗栽植嘴式植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):65-72.
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):65-72. (in Chinese)

[28] 金鑫,李树君,杨学军,等. 膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):29-34.
JIN Xin, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Motion analysis and parameter optimization for pot seedling planting mechanism based on up-film transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):29-34. (in Chinese)