doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.027

拖拉机前悬挂拨指式油菜割晒机设计与试验

舒彩霞[1,2]　秦一鸣[1]　廖庆喜[1,2]　张青松[1,2]　袁佳诚[1]　万星宇[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: 针对采用侧向铺放的油菜割晒机在作业过程中,植株横向输送易堵塞、侧向铺放质量有待提高等问题,结合拖拉机保有量大的实际情况,本文设计了一种拖拉机前悬挂拨指式油菜割晒机,采用链条拨指输送装置及阶梯状排禾口约束油菜稳定输送与有序排禾。利用动力学与运动学分析了油菜植株切割后扶持喂入、横向输送及差速排禾的运动过程,结合油菜植株物料特性及侧向铺放机理,对参数优化并确定了各关键部件较优参数范围,以铺放角度、上下层铺放角度差、铺放宽度变异系数和铺放高度变异系数为评价指标,开展了铺放质量二次回归正交组合试验确定运行参数间的较优参数组合,并进行了田间验证试验。动力学与运动学分析结果表明,油菜割晒机较优参数组合为拨禾轮转速 46 ~ 72 r/min、割台横向输送装置倾角 35°、链条拨指安装间距 240 mm、横向输送装置线速度 1.1 ~ 1.7 m/s;二次回归正交组合试验结果表明,横向输送装置线速度对铺放角度、铺放角度差、铺放宽度变异系数和铺放高度变异系数的影响最为显著,较优参数组合为拨禾轮转速 72 r/min、横向输送线速度 1.6 m/s、机组前进速度 1.6 m/s。田间试验结果表明,割晒机作业过程中油菜植株输送顺畅、铺放有序,较优参数组合条件下油菜平均铺放角为 79.9°、上下层平均铺放角度差为 10.7°、铺放宽度变异系数为 9.2%、铺放高度变异系数为 9.1%、机具作业效率为 0.75 hm^2/h。研究结果可为油菜割晒机结构改进和优化提供参考。

关键词: 油菜; 割晒机; 拖拉机前悬挂; 链条拨指; 参数优化
中图分类号: S222.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0285-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Tractor Front Suspension Finger Type Rape Windrower

SHU Caixia[1,2]　QIN Yiming[1]　LIAO Qingxi[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]　YUAN Jiacheng[1]　WAN Xingyu[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: Aiming at the difficulty of the lateral conveying of rapeseed plants, which was easy to be blocked and the quality of lateral laying needed to be improved in the operation process of the side-laid windrower, combined with the reality of the large number of tractors, a tractor front-suspension finger type windrower was developed, and the chain toggle finger conveying device and the stepped discharge port were used to restrain the stable transportation and orderly discharge of rapeseed stalks. Dynamics and kinematics were used to analyze the motion process of support feeding, transverse transport and differential crop removal after cutting of rape stem. The optimal parameter range of each key component was determined based on the material characteristics of rape stem and lateral laying mechanism. The variation coefficient of lay-up angle, the difference of lay-up angle between upper and lower layers, the variation coefficient of lay-up relaxation and the variation coefficient of lay-up height were further used as evaluation indexes. The quadratic regression orthogonal combination test of lay-up mass was carried out to determine the optimal parameter combination among the operating parameters, and the field verification test was carried out. The results of dynamic and kinematic analysis showed that the optimal parameter

收稿日期: 2024-08-02　修回日期: 2024-08-29
基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202216)、国家重点研发计划项目(2021YFD1600502)和财政部和农业农村部:国家现代油菜产业技术体系项目(CARS-12)
作者简介: 舒彩霞(1969—),女,副教授,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: shucaixia@mail.hzau.edu.cn
通信作者: 万星宇(1991—),男,副教授,博士,主要从事油菜机械化收获技术与装备研究,E-mail: wanxy@mail.hzau.edu.cn

range of rape windrower of the rotating speed of the wheeling wheel was 46 ~ 72 r/min, the angle of the transverse conveying device of the cutting table was 35°, the installation distance of the chain dipper finger was 240 mm, the linear speed of the transverse conveying device was 1.1 ~ 1.7 m/s. Quadratic regression orthogonal combination test results showed that the linear speed of the transverse conveying device had the most significant influence on the lay-up angle, lay-up angle difference, lay-up relaxation variation coefficient and lay-up height variation coefficient. Under the optimal combination of parameters, the speed of the wheel was 72 r/min, the linear speed of the transverse conveying speed was 1.6 m/s, and the forward speed of the machine was 1.6 m/s. Field experiments showed that during the operation of the windrower, the rapeseed plants were transported smoothly and laid in an orderly manner, and the average laying angle of stalks was 79.9° under optimal parameter combination conditions. The average lay-up angle difference between upper and lower layers was 10.7°, the coefficient of variation of paving width was 9.2%, the coefficient of variation of paving height was 9.1%, and the operation efficiency of machinery and tools was 0.75 hm^2/h. The research can provide reference for improving and optimizing the structure of rapeseed windrower.

Key words: rapeseed; windrower; tractor front suspension; chain fingers; parameter optimization

0 引言

油菜是我国第一大油料作物,2022 年油菜种植面积为 7.253×10^6 hm^2[1]。油菜机械化收获主要分为分段收获和联合收获两种方式,联合收获是在油菜黄熟期一次完成收割、脱粒、清选等作业环节的作业方式;分段收获是在油菜黄熟前期,将油菜割倒铺放田间,再进行捡拾脱粒;相较于联合收获,具有损失率低、对作物适应性强和油菜籽品质高等优点[2-4]。割晒有序铺放作业是分段收获的关键环节[5-8],有序铺放作业质量不佳一方面会导致油菜晾晒不均匀,另一方面会使后期捡拾喂入量波动,增大分段收获作业综合损失。

国外油菜割晒机技术已非常成熟,具备多种型号适应不同规模农业生产[9-10]。其通常配备专用高地隙动力底盘和宽幅柔性可调割台,如 John Deere 的 JD A400 系列油菜割晒机割幅可达 6.4 m;加拿大 MacDon M200 型割晒机割幅为 6.1 ~ 12.2 m,能够实现双向驾驶。在关键装置及调控技术方面,采用高速切割、物料主动有序输送等技术,以及高性能切割刀具和喂入输送带等附件的应用;同时,部分自走式油菜割晒机配备智能化速度控制系统,可以根据作业需求和喂入量自动调节机组前进速度[11-13],提高了收获适应性,使分段收获有序铺放作业效率达 2 ~ 27 hm^2/h。由于我国油菜主要种植区域为长江流域,油菜多种至于中小型地块,国外宽幅专用化割晒机造价高、运输困难、转弯半径大,在我国普及率不高。

目前国内围绕油菜机械化割晒开展了广泛研究,按铺放机理,可分为中间铺放型割晒机和侧边铺放型割晒机。中间铺放型油菜割晒机[14-15]采用将两侧油菜向中间输送的机理,将油菜铺放于底盘中部空隙,其输送稳定、铺放效果优且利于后期捡拾作业,但往往需要与高地隙底盘或专用底盘配合;侧边铺放型油菜割晒机[16-17]将油菜向机具一侧输送至底盘侧边完成铺放,其能够解决中间铺放型油菜割晒机割台需额外配置底盘问题,其大多由稻麦联合收获机更换割台完成机械化割晒,与保有量大拖拉机底盘配合鲜有研究,研制一种能快速挂接于拖拉机前端的割晒机具有良好的市场前景。但侧边铺放型割晒机由于输送距离较长,茎秆在输送铺放过程中易受外力偏移,同时在排禾口处茎秆不受约束直接排出,未对铺放角形成控制,铺放质量有待提高。

针对上述问题,本文设计一种拖拉机前悬挂链条拨指式油菜割晒机,采用斜卧式割台横向输送、侧边铺放的工艺方案,区别于现有的侧边铺放型油菜割晒机,结合适收期油菜物料特性,通过多排链条拨指装置,分别作用于油菜植株不同部位,实现油菜强制输送;不同长度的链条拨指装置形成阶梯状排禾口,角果层输送时间长于茎秆处,实现油菜植株差速排禾;植株受角果层重力及横向初速度在掉落时转向,平行铺放于田间。开展整机布局和关键部件设计与分析;基于动力学解析油菜植株横向输送与有序铺放工作过程,确定相关结构参数及运动参数;通过参数优化试验,明确各部件运动参数对油菜茎秆铺放质量的影响,及较优运动参数组合。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构组成

拖拉机前悬挂链条拨指油菜割晒机由拖拉机动力底盘、液压升降架和割台组成,其整机结构如图 1 所示,其中割台关键部件包括拨禾轮、机架、横向输送装置、横割刀和竖割刀,如图 2 所示。液压升降架可控制割台平行升降;链条拨指横向输送装置与导

禾板倾斜布置于机架上侧，倾角为 35°；割台动力源为布置于割台后侧汽油机，通过机械传动带动割刀、拨禾轮及横向输送装置运动；割晒机主要技术参数如表 1 所示。

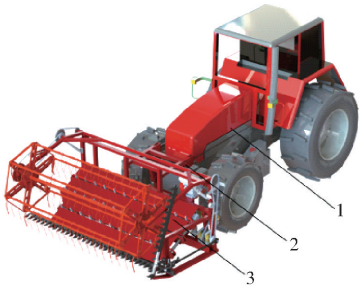


图 1　拖拉机前悬挂拨指式油菜割晒机结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of tractor front hanging finger type rape windrower

1. 拖拉机动力底盘　2. 液压升降架　3. 割台

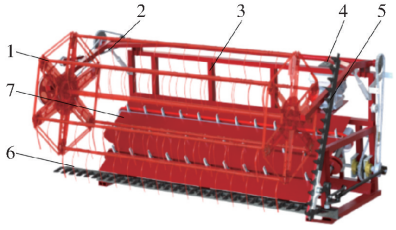


图 2　割台结构示意图

Fig. 2　Schematic of structure of mower

1. 拨禾轮　2. 拨禾轮升降架　3. 机架　4. 汽油机　5. 竖割刀　6. 横割刀　7. 横向输送装置

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

参数	数值/形式
外型尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 640×2 500×2 800
传动方式	机械传动
割幅/mm	2 500
割台质量/kg	450
割台功率/kW	4
割台升降高度/mm	0～732

1.2　工作过程

当割晒机在田间作业时，割刀系统将田间油菜分选出待收割区域，并将待收割区油菜植株切断，拨禾轮将其拨入割台；切割后油菜植株进入横向输送装置，采用链条带动拨指方式，使油菜茎秆得以横向传导输送；油菜植株输送至排禾口区域时，由于上侧链条拨指装置长度长于底侧横向输送装置，油菜角果处输送时间长于油菜茎秆处，油菜在横向输送装置尾端转向，后受自身重力作用脱离割台做平抛运动和定轴转动的合成运动铺放至田间。在拨指作用及排禾口形状约束下，油菜茎秆平行铺放于田间，降低了茎秆间牵扯作用对铺放质量的影响，保证了铺放姿态一致性，便于后期晾晒和捡拾脱粒清选作业。其工作过程如图 3 所示。

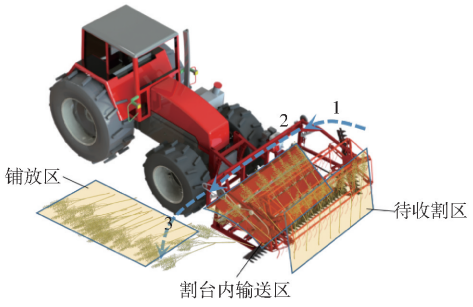


图 3　割晒机工作过程示意图

Fig. 3　Schematic of windrower operation process

1. 茎秆扶持喂入过程　2. 茎秆横向输送过程　3. 茎秆差速排禾过程

2　作业过程分析及关键部件设计

2.1　茎秆扶持喂入过程分析

为确定割台各关键部件结构参数，需对适收期油菜物料特性进行测量。自然生长状态下，其角果层位于茎秆上侧，植株参数如图 4、表 2 所示。其中点 O 为植株与地面接触点；点 A 为割晒机横割刀切割点；点 B 为切割后油菜茎秆重心；点 C 为油菜植株顶点。

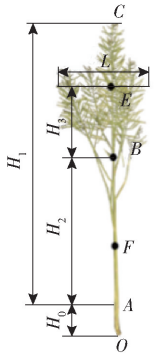


图 4　油菜植株参数示意图

Fig. 4　Schematic of rape plant parameters

表 2　油菜植株主要技术参数

Tab. 2　Main technical parameters of rape plant

mm

参数	数值
株高 H_1	1 501.5
角果层宽度 L	323.6
茎秆直径 L_0	10.4
割茬高度 H_0	300.0
角果层距重心距离 H_3	243.1
切割后油菜重心高度 H_2	540.4

理论状态下，油菜植株被切割后由拨禾轮扶持做平抛运动至割台，植株运动过程如图 5 所示。

油菜植株切割与分禾主要是通过横割刀和竖割刀实现，是油菜割晒的首要环节。横竖割刀均采用

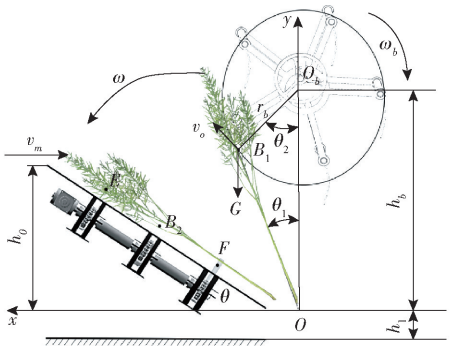


图 5 茎秆扶持喂入过程

Fig. 5 Rape stalk support feeding process

单刀距行程型往复式切割器,割刀行程、动刀片节距、护刃器均为 76.2 mm,曲柄滑块传动装置其曲柄长度 r_q 为割刀行程一半,取 38 mm;为保证拖拉机不碾压铺放区油菜,割幅应长于拖拉机宽度,取横割刀长 2 500 mm;为降低油菜分枝牵扯导致落粒损失,竖割刀将待收割区油菜植株角果层切割分开,其顶端应接近油菜植株顶点 C,由于割晒作业时割台距地面约 300 mm,故取竖割刀长 1 200 mm。

设切割速比 λ_q 为割刀速度 v_q 与机具前进速度 v_m 比值,即

$$\lambda_q = \frac{v_q}{v_m} = \frac{\frac{nS}{30}}{\frac{nH}{30}} = \frac{S}{H} \tag{1}$$

式中 S——割刀单行程距离,mm

H——割刀进距,mm

n——割刀曲柄转速,r/min

根据文献[18],λ_q 一般为 0.8 ~ 1.2,且谷物割晒机 H 为 2.4 ~ 4.0 倍茎秆直径 L_0,机具前进速度 v_m 为 1.0 ~ 1.6 m/s,经计算得,割刀速度 v_q 为 1.0 ~ 1.5 m/s,割刀单行程距离 S 为 25.0 ~ 41.6 mm;曲柄转速计算式为

$$n_q = \frac{0.015 v_q}{r_q} \tag{2}$$

式中 r_q——割刀曲柄半径,mm

计算得割刀曲柄转速 n_q 为 394 ~ 631 r/min。

拨禾轮主要作用是扶持油菜,将待收割油菜引向切割器,同时在茎秆被切断后,将茎秆推向割台输送装置;拨禾轮上任意一点运动轨迹为

$$\begin{cases} x = v_m t + r_b \cos(\omega_b t) \\ y = \dfrac{H_2}{\cos\theta_1} - r_b \sin(\omega_b t) \end{cases} \tag{3}$$

对式(3)求导得

$$\begin{cases} v_{bx} = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v_m - r_b \omega_b \sin(\omega_b t) \\ v_{by} = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = -r_b \omega_b \cos(\omega_b t) \end{cases} \tag{4}$$

式中 t——拨禾轮转动时间,s

r_b——拨禾轮半径,m

θ_1——油菜植株主茎与地面垂线 OO_b 夹角,(°)

ω_b——拨禾轮角速度,rad/s

v_{bx}——拨禾轮线速度水平分量,m/s

v_{by}——拨禾轮线速度垂直分量,m/s

在机具前进过程中,拨禾轮线速度水平分量相对机具向后,即 $v_{bx} < 0$,所以

$$v_m < r_b \omega_b \sin(\omega_b t) \leqslant r_b \omega_b \tag{5}$$

设 λ_b 为拨禾轮线速度与机具前进速度比值,即

$$\lambda_b = \frac{r_b \omega_b}{v_m} \geqslant 1 \tag{6}$$

设计偏心式拨禾轮半径 r_b 为 500 mm;机具前进速度 v_m 为 1.0 ~ 1.6 m/s;根据《农业机械设计手册》拨禾轮速比 λ_b 取 1.2[18];计算得拨禾轮角速度 ω_b 为 2.4 ~ 3.8 rad/s;可得拨禾轮转速为 45.8 ~ 72.6 r/min。根据割晒机实际田间工作要求,确定拨禾轮转速 n_b 为 46 ~ 72 r/min。

如图 5 所示,设拨禾轮安装高度为 h_b;根据油菜物料特性,油菜茎秆重心位置为点 B,距切割点高度 H_2,则拨禾轮需安装高度 h_b 应满足

$$h_b > r_b + H_2 \tag{7}$$

由植株物料特性可知,H_2 平均值为 540.4 mm,拨禾轮半径 r_b 为 500 mm,因此取拨禾轮安装高度应大于 1 050 mm。

为使割晒机能适用于高产倒伏油菜,故采用斜卧式割台,倾角 θ 应满足输送装置不与拨禾轮干涉,同时保持不下滑,其中茎秆与割台钢板的静摩擦因数 η 约为 0.71[19-20],故

$$\begin{cases} \theta \leqslant 90° - \arcsin\dfrac{r_b}{h_b} \\ \theta \leqslant \arctan\eta \end{cases} \tag{8}$$

经计算,$\theta \leqslant 35.3°$,同时为缩短机具纵向尺寸,应在范围内取较大角度,故取割台倾角 θ 为 35°。

油菜植株在点 B_1 处时,其脱离拨禾轮,初速度 v_0 为

$$v_0 = \frac{\pi r_b n_b}{30} \tag{9}$$

式中 n_b——拨禾轮转速,r/min

同时,由于作业过程中机具向前运动,油菜植株相对机具有向后的绝对速度,油菜向割台倾倒,其角速度 ω 及角加速度 α 为

$$\begin{cases} \omega = \dfrac{v_0 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{H_2} \\ \alpha = \dfrac{M_y}{J} = \dfrac{Gh\sin\theta_1}{m\dfrac{H_2^2}{3}} \end{cases} \tag{10}$$

式中　M_y——油菜植株重力对点 A 的力矩，N·m

J——油菜植株绕点 A 转动惯量，kg·m^2

G——油菜植株重力，N

θ_2——油菜植株重心和拨禾轮回转重心连线 B_1O_b 线与地面垂线 OO_b 夹角，(°)

其中，v_0可分解为垂直方向速度 v_{0x}和水平方向速度 v_{0y}，设油菜植株下落至割台时间为 t_1，点 B_1、B_2 距离为 d_B，在时间 t_1 内油菜植株沿 x、y 轴运动方程为

$$\begin{cases} v_{0x}=v_0\sin(\theta_1+\theta_2) \\ d_{Bx}=v_{0x}t_1=\sqrt{2H_2^2(1-\cos(90°-\theta-\theta_1))}\cdot \\ \quad \cos\left(\dfrac{H_2\sin(90°-\theta-\theta_1)}{d}-\theta\right) \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} v_{0y}=v_0\cos(\theta_1+\theta_2) \\ d_{By}=v_{0y}t_1-\dfrac{1}{2}gt_1^2= \\ \quad \sqrt{2H_2^2(1-\cos(90°-\theta-\theta_1))}\cdot \\ \quad \sin\left(\dfrac{H_2\sin(90°-\theta-\theta_1)}{d}-\theta\right) \end{cases} \tag{12}$$

式中　d_{Bx}、d_{By}——在时间 t_1 内油菜植株沿 x、y 轴方向的距离

由式(11)、(12)可知，油菜植株在经过拨禾轮扶持后，斜抛至倾斜的输送装置上侧，需确定链条拨指装置安装间距，保证链条拨指装置能顺利横向输送油菜植株。若排布太密，易导致油菜植株在输送过程中受力不均从而发生转向；若间距太远，易导致拨指无法作用于植株重心，使得油菜植株堵塞割台。所以确定上层拨指作用于油菜角果层 E，中层拨指作用于切割后油菜重心 B，为防止油菜在输送过程中转向，下层拨指等距安装于茎秆 F 处。由植株物料特性可知，角果层距重心距离 H_3为 243.1 mm，油菜茎秆重心距切割点 H_1为 540.4 mm，取整确定安装距离 d_{B2F}为 240 mm，d_{B2E}为 240 mm。

2.2　茎秆横向输送过程分析与结构设计

油菜割晒机割台主要的输送方式有输送带式和拨指装置式[21-22]，相对于输送带式，拨指装置对于含水率高、质量大的油菜植株，输送能力较好，不易造成割台堵塞。横向输送装置结构如图 6 所示，主要包括 3 个链条拨指装置、4 个导禾板及排禾口。作业过程中，油菜经割刀切断、拨禾轮扶持倒入割晒台横向输送装置，输送装置传动轴带动链条拨指装置转动，将油菜向排禾口运输，形成侧边铺放，为后期捡拾脱粒提供良好条件。

链条拨指装置由拨指、链轮和链盒组成，如

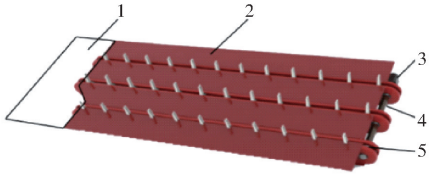


图 6　横向输送装置结构示意图

Fig. 6　Schematic of structure of transverse conveying device

1. 排禾口　2. 导禾板　3. 齿轮箱　4. 输送装置传动轴　5. 链条拨指装置

图 7a 所示，拨指等间隔铰接在输送链上，输送链通过链轮安装在链盒内部，链盒内布置有导轨；其中，拨指长度 L_1约等于油菜角果层半径 $L/2$，保证输送时拨指作用于油菜主茎秆，带动底层油菜从而能侧向带动上层油菜运动，根据物料特性 $L=323.6$ mm，取 $L_1=150$ mm；拨指间隔 L_2略大于拨指长度 L_1，取 $L_2=196.8$ mm，既能保证拨指顺利缩回，同时能保证最多拨指数量，增强对油菜茎秆作用力。

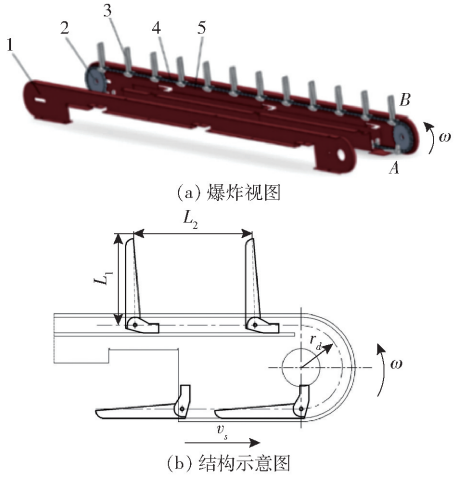


图 7　链条拨指装置

Fig. 7　Diagrams of chain finger device

1. 链盒　2. 链轮　3. 拨指　4. 链条　5. 导轨

为保证油菜能从排禾口顺利排除，需确定链条拨指装置横向输送速度。横向输送速度过快，易导致排禾口植株过多，铺放角度不稳定，铺放高度过高，影响后期捡拾作业；横向输送速度过慢，油菜会堆积在割台内无法排出，导致割台堵塞。

设机具前进速度为 v_m，横向输送速度为 v_s，田间油菜密度为 ρ_z，割台内油菜植株密度为 ρ_s，割晒机割幅为 B，则在作业时割晒机喂入量 Q_1为

$$Q_1=\rho_z B v_m\frac{B}{v_s}=\rho_z B^2\frac{v_m}{v_s} \tag{13}$$

同一时间，割台输送铺放量 Q_2为

$$Q_2=\rho_s B v_s\frac{L_1}{v_s}=\rho_s B L_1 \tag{14}$$

为保证铺放质量及防止割台堵塞，在同一时间内，喂入量 Q_1应该小于割台输送铺放量 Q_2，经计算得

$$\rho_z B^2 \frac{v_m}{v_s} < \rho_s B L_1 \tag{15}$$

即

$$v_s > \frac{\rho_z B}{\rho_s L_1} v_m$$

已知割晒机割幅 B 为 2 500 mm，拨指长度 L_1 为 150 mm。令 $\rho_q = \rho_s / \rho_z$，ρ_q 为谷物聚集系数，是一个关于油菜种植密度、茎秆分枝数的油菜作物综合系数，ρ_q 为 12 ~ 25[23]，为确保割晒机能适应高产油菜，取 ρ_q 为 15。经测量，拖拉机在田间不同挡位前进速度 v_m 为 1.0 ~ 1.6 m/s，计算得 v_s 为 1.1 ~ 1.7 m/s。

2.3 茎秆差速排禾过程分析

排禾口是实现油菜有序割晒铺放的关键，排禾口形状、位置决定油菜铺放质量[24~28]。植株在被拨指输送至出口时，由于机具前进，油菜会同时做定轴转动与平抛的合成运动，会使油菜植株在下落过程中产生转角，出现铺放角度差过大等情况，不利于转向铺放及后期捡拾作业。为解决上述问题，设计不同长度链条拨指装置，形成阶梯状排禾口，如图 8 所示。

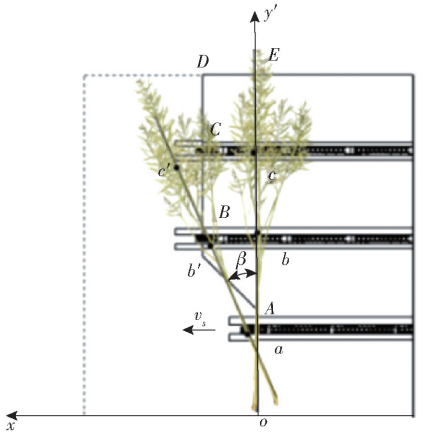


图 8 油菜茎秆排禾口转向运动过程示意图

Fig. 8 Schematic of turning movement process of rapeseed straw discharge mouth

由图 8 可知，当油菜植株运动至点 A 时，植株 a 处已不受拨指横向作用力，而植株 b、c 处依然受拨指横向作用力，此段时间内，在 xoy' 平面，油菜植株做 x 方向、速度为 v_s 的匀速直线运动和绕点 A 的旋转运动的合成运动。

已知点 A、B、C、D 纵坐标，确定点 B、C、D 横坐标可确定排禾口形状。设 DE 距离为 l，则各点坐标 $A(0,240\text{ mm})$、$B(l,480\text{ mm})$、$C(l,720\text{ mm})$、$D(l,960\text{ mm})$，设时间为 t_2，则该时间内油菜茎秆运动轨迹方程为

$$\begin{cases} l = v_s t_2 \\ \beta = \dfrac{v_s}{0.24 + \dfrac{0.24}{2}} t_2 \end{cases} \tag{16}$$

通过式(16)可确定 β 与 l 的关系，需进一步分析油菜植株从排禾口落地过程，确定满足铺放条件的 β 从而确定 l。以点 O 建立坐标轴，其中 xOz 为地面、yOz 为垂直面、xOy' 为横向输送装置平面，如图 9 所示。

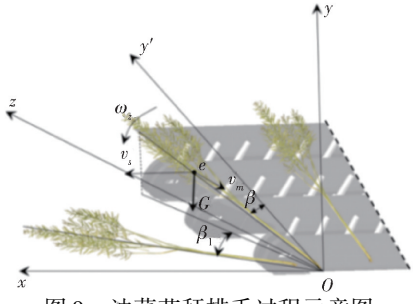


图 9 油菜茎秆排禾过程示意图

Fig. 9 Schematic of rapeseed straw discharge process

当油菜植株脱离横向输送装置时，油菜仅受重力作用，为方便理论计算，下落过程中茎秆底部接触地面，上侧果夹层下落转向。同时，由于机具前进、横向输送装置运动及油菜植株在排禾口处的转向，植株有 z 轴负方向初速度 v_m、x 轴正方向初速度 v_s 及 xOy' 平面初角速度 ω_z，做多方向合成运动，将运动向不同平面分解。

在 xOy 垂直面，割台倾角 θ 为 35°，植株脱离割台时速度合成 v_{so} 作用点为点 e，所以取点 e 为植株运动中心，则在垂直方向，油菜植株下落时间 t_3 为

$$t_3 = \sqrt{\frac{2h_e}{g}} = \sqrt{\frac{2l_o \sin\theta}{g}} \tag{17}$$

式中 h_e——点 e 距地面高度

计算得 t_3 为 0.27 s。

在 xOz 水平面，时间 t_3 内，中心点 e 旋转角 β_1 分别由初速度 v_m 产生得转角 β_m、初速度 v_s 产生得转角 β_s、初角速度 ω_z 产生得转角 β_z 组成，即

$$\begin{cases} \beta_1 = \beta_m + \beta_s + \beta_z \\ \beta_m = \dfrac{v_m \sin\theta}{2 \times 0.24 + \dfrac{0.24}{2}} t_3 \\ \beta_s = \dfrac{v_s \cos\beta}{2 \times 0.24 + \dfrac{0.24}{2}} t_3 \\ \beta_z = \omega_z t_3 = \dfrac{v_s}{0.24 + \dfrac{0.24}{2}} t_3 \end{cases} \tag{18}$$

根据上述分析，横向输送装置线速度 v_s 取 1.4 m/s，机具前进速度 v_m 取 1.3 m/s，令茎秆在排禾口下落总偏转角为 β_0，计算得

$$\beta_0 = \beta + \beta_1 = 69.1° + 1.63\beta \tag{19}$$

为方便后期捡拾脱粒作业，油菜植株铺放角需

尽量与机具前进方向垂直，即 $\beta_0 \approx 90°$，计算得 β 为 12.8°，代入式(16)，得上侧链条拨指装置比下侧长 l 为 0.22 m。通过阶梯状排禾口，实现油菜植株侧向有序铺放。

2.4　割台升降部件设计

为保证割台能前置悬挂于动力底盘，且在作业时能够根据油菜长势实现割台升降，需根据作业需求设计连接动力底盘和割台升降架[29-31]。现有的油菜割晒机割台前悬挂装置主要有垂直升降和平行升降两种装置，由于割台采用汽油机作为动力，需有足够纵向空间预留安装位置，故采用平行升降液压装置。

根据割晒机田间作业及运输要求，初步确定液压升降装置整体结构如图 10 所示，其中点 A_1、B_1、C_1、D_1、A_2、B_2、C_2、D_2为各部件铰接点。其中主架后侧连接拖拉机，上、下支架分别以主架铰接点 C_1、C_2、D_1、D_2为旋转中心，液压缸伸缩带动上下支架做圆周运动完成割台升降过程。

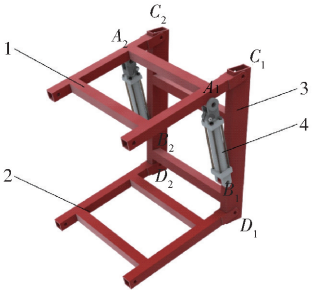


图 10　液压升降装置结构示意图

Fig. 10　Schematic of structure of hydraulic lifting device

1. 上支架　2. 下支架　3. 主架　4. 液压缸

为满足割晒机运输、停放，液压缸极限位置需与割台最高与最低点对应。其运动过程如图 11a 所示，其中点 G 为升降架前侧割台中心，液压缸活塞顶端由点 A 运动至点 A'，设上、下支架长 $l_{DE}=l_{CF}=l_z$、液压缸活塞收缩到底部 $l_{AB}=l_1$、活塞伸出到顶部 $l_{A'B}=l_2$、$l_{AC}=l_{A'C}=d_1$、$l_{BC}=d_2$，则割台中心 G 上升高度 h 为

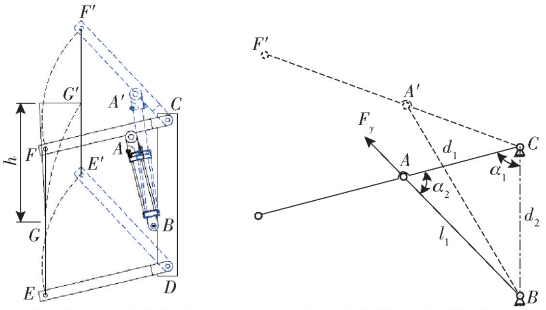
$$\begin{cases} h=\sqrt{2l_z^2(1-\cos\theta_0)}\cos\alpha_0 \\ \theta_0=\theta_2-\theta_1 \\ \theta_1=\arccos\dfrac{d_1^2+d_2^2-l_1^2}{2d_1d_2} \\ \theta_2=\arccos\dfrac{d_1^2+d_2^2-l_2^2}{2d_1d_2} \end{cases} \tag{20}$$

式中　θ_0——支撑架转角，(°)

α_0——支撑架初始角度，(°)

l_1——液压缸长度，mm

l_z——上支架 CF 长度，mm



(a) 升降装置运动示意图　　(b) 升降装置受力简图

图 11　液压升降装置运动受力分析示意图

Fig. 11　Schematics of movement of hydraulic lifting device

根据整机布局结构，以确定液压缸收缩时 l_1 为 450 mm，液压缸行程 300 mm，活塞伸出到顶端 l_2 为 750 mm；结合割台后侧传动布局，设计上下支架 l_z 为 620 mm；则割台中心点 G 上下行程取决于液压缸上下侧安装位置，即点 A、B 位置。根据拖拉机悬挂装置运输高度和提升行程标准[32]，需 h 大于 700 mm，将上述数据代入式(20)，计算取整得 $d_1=500$ mm、$d_2=300$ mm，反代入式(20)，得 $h=732$ mm，满足割晒机运输需求。

重心位置是影响拖拉机前悬挂拨指式油菜割晒机作业及运输的稳定性和安全性的重要因素，通过 Solidworks 确定割台重心位置 o_1，以东方红 954 型拖拉机为底盘，根据其参数确定重心 o_3 和重力 G_2，以拖拉机前轮支撑点为原点，建立 xoy 坐标轴，如图 12 所示，以割晒机作业状态(留茬 h_1 为 300 mm)，通过机具纵向位移系数 W 计算其重心，即

$$W=\frac{G_1D_1}{G_2D_2+G_3D_3} \tag{21}$$

式中　G_1、G_2、G_3——割台、整机、拖拉机底盘重力，N

D_1、D_2、D_3——割台重心、整机重心、拖拉机底盘重心到支撑点距离，mm

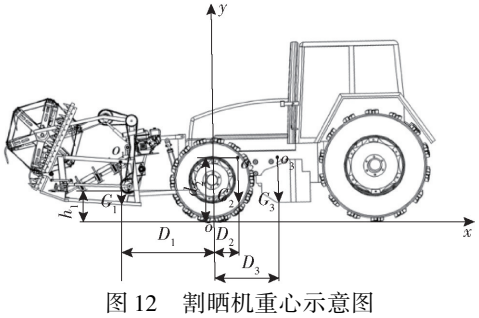


图 12　割晒机重心示意图

Fig. 12　Schematic of center of gravity of windrower

机具纵向位移系数 W 是评价机具前悬挂稳定性的重要指标，为保证机具作业时轮胎与地面有较好的附着力，纵向位移系数 W 取 0.1[33]，经计算整机重心到支撑点距离为 323.5 mm。由式(21)及图 12 可知，当割台上升时，割台重心至支撑点水平距离 D_1 减少，整机重心更靠近支撑点，整机稳定性更优。

为确定割台升降过程中液压缸所受载荷,根据整体布局和液压缸行程参数对杆 CF 受力分析,其受力如图 11b 所示,割台升降过程中可将升降装置每一个瞬间看作一个平衡位置。根据力矩平衡原理,对旋转中心点 C 取矩,设杆 CF 与杆 CD 夹角为 α_1,液压缸 AD 与杆 CF 夹角为 α_2,点 F 受割台重力 F_g,点 A 受液压缸支持力 F_y,忽略杆 CF 自身重力,则液压缸需提供的支持力 F_y 为

$$\begin{cases} F_y = \dfrac{F_g \sin\alpha_1 l_z}{\sin\alpha_2 d_2} \\ \dfrac{d_2}{\sin\alpha_2} = \dfrac{l_1}{\sin\alpha_1} \end{cases} \tag{22}$$

整理得

$$F_y = \frac{F_g l_1 l_z}{d_2^2} \tag{23}$$

液压缸所提供支持力 F_y 与液压缸长度 l_1 呈线性相关,当液压缸伸出到顶部点 A' 时,其所提供支持力最大为 22 950 N。

3 关键部件参数优化试验

3.1 试验方法与评价指标

根据前文分析,与拖拉机前悬挂拨指式油菜割晒机铺放质量相关的主要参数包括割晒机前进速度、拨禾轮转速、输送带线速度,通过试验研究各因素及其交互关系对铺放质量的影响。在开展试验时固定割台高度和拨禾轮位置,以铺放角度、上下层铺放角度差、铺放宽度变异系数和铺放高度变异系数为铺放质量评价指标,研究拨禾轮转速、输送带线速度、机具前进速度对铺放质量的影响。

铺放质量影响因素试验于 2023 年 4 月 28 日在湖北省荆门市开展,油菜品种为庆油杂,油菜平均株高为 1 684 mm,切割后油菜重心高度为 788 mm,最低分枝高度为 682 mm,主茎秆直径为 17 mm,田间种植密度为 29.5 株/m^2。油菜割晒割台高度保持 300 mm,试验测区长度约为 22 m。

试验结束后在测区内每隔 2 m 选定一个测点,共 10 个。用皮尺测量各测点铺放宽度 l_c,用钢卷尺测量各测点铺放高度 h_c。从测点处上、下铺层中各选 1 株油菜,测量上层铺放角 θ_h 和下层铺放角 θ_u。

铺放角 θ_c 计算式为

$$\theta_c = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}\frac{\theta_h + \theta_u}{2} \tag{24}$$

上、下层铺放角度差 $\Delta\theta$ 计算式为

$$\Delta\theta = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}(\bar{\theta}_h - \bar{\theta}_u) \tag{25}$$

式中 $\bar{\theta}_h$——上层茎秆平均铺放角,(°)

$\bar{\theta}_u$——下层茎秆平均铺放角,(°)

利用各工作参数组合下铺放宽度变异系数评价铺放宽度一致性,计算式为

$$C_{V_P} = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}(l_{ci} - \bar{l}_c)}}{\bar{l}_c} \times 100\% \tag{26}$$

式中 C_{V_P}——铺放宽度变异系数,%

$\bar{l}_c$——铺放宽度平均值,m

利用各参数组合下铺放高度变异系数评价铺放高度一致性,计算式为

$$C_{V_h} = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}(h_{ci} - \bar{h}_c)}}{\bar{h}_c} \times 100\% \tag{27}$$

式中 C_{V_h}——铺放高度变异系数,%

$\bar{h}_c$——铺放高度平均值,m

以拨禾轮转速 x_1、横向输送装置线速度 x_2、机具前进速度 x_3 为试验因素,以铺放角 Y_1、上、下层铺放角度差 Y_2、铺放宽度变异系数 Y_3 和铺放高度变异系数 Y_4 为评价指标,开展三因素二次回归正交组合试验,根据上述分析,确定 x_1 为 46 ~ 72 r/min,x_2 为 1.1 ~ 1.7 m/s,x_3 为 1.0 ~ 1.6 m/s,试验因素编码如表 3 所示。

表 3 因素编码

Tab.3 Factors and levels coding

编码	因素		
	x_1/(r·min^{-1})	x_2/(m·s^{-1})	x_3/(m·s^{-1})
-1	46	1.1	1.0
0	59	1.4	1.3
1	72	1.7	1.6

基于 Box - Behnken 试验设计方法,选取 5 个中心点,共开展 17 组试验。通过贡献率 K 量化分析各因素对铺放质量的影响,K 越大因素对模型的影响越大,贡献率 K 计算式为

$$K_j = \frac{S_{S_j}}{S_{S_t}} \times 100\% \quad (j = 1,2,3) \tag{28}$$

其中

$$S_{S_j} = S_{SX_j} - f_j M_{S_E} \tag{29}$$

式中 S_{S_j}——因素纯平方和

S_{S_t}——各因素及误差平方和总和

S_{SX_j}——因素平方和

M_{S_E}——误差均方

f_j——因素自由度

3.2 试验结果分析

试验铺放质量结果如表 4 所示,其中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 4　试验设计与结果

Tab. 4　Simulation test design and results

测试号	因素			Y_1/	Y_2/	Y_3/	Y_4/
	X_1	X_2	X_3	(°)	(°)	%	%
1	0	0	0	81.0	10.3	20.0	11.2
2	−1	1	0	87.2	11.4	15.4	11.9
3	0	1	−1	81.1	12.5	11.2	7.4
4	1	−1	0	75.7	16.8	6.0	7.1
5	0	−1	−1	76.1	15.8	7.3	12.6
6	0	0	0	81.0	10.3	20.0	11.2
7	−1	0	1	86.1	6.7	11.3	17.7
8	1	0	1	83.5	7.8	8.4	8.3
9	0	0	0	81.0	10.3	20.0	11.2
10	1	0	−1	78.7	16.3	6.5	8.9
11	0	0	0	81.0	10.3	20.0	11.2
12	1	1	0	85.3	10.7	15.4	11.2
13	−1	0	−1	82.3	10.9	11.2	11.9
14	−1	−1	0	80.1	11.2	6.0	7.4
15	0	−1	1	74.3	11.6	7.3	7.1
16	0	0	0	81.0	10.3	20.0	12.6
17	0	1	1	84.2	10.6	11.3	11.2

对铺放角 Y_1、上下层铺放角度差 Y_2、铺放宽度变异系数 Y_3 和铺放高度变异系数 Y_4 与试验因素 X_1、X_2、X_3 的关系进行二次多元拟合，并对回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验，结果如表 5 所示。

由表 5 可知，对于铺放角 Y_1，回归模型极显著（$P<0.01$），失拟值不显著（$P>0.05$），说明模型能正确反映 Y_1 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系并对试验结果进行预测。其中 X_1、X_2、X_1^2 影响极显著（$P<0.01$），X_3、X_2X_3、X_2^2 影响显著（$0.01\leqslant P<0.05$），其他因素影响不显著，剔除不显著因素后，铺放角 Y_1 二次回归模型为

$$Y_1=81-1.56X_1+3.95X_2+1.24X_3+1.23X_2X_3+2.4X_1^2-1.33X_2^2 \tag{30}$$

由式（28）、（29）可知，各因素对 Y_1 影响贡献率分别为 $K_{Y1X1}=9.58\%$，$K_{Y1X2}=61.25\%$，$K_{Y1X3}=6.01\%$，影响由大到小为 X_2、X_1、X_3。根据图 13，当 $X_1=0$ 时，Y_1 随 X_2 增大而逐增加，Y_1 随 X_3 先增加后减少，存在某一 X_3，Y_1 最接近 90°，响应面曲线沿 X_2 方向变化更快，说明 X_2 对 Y_1 影响比 X_3 显著。原因为在横向输送装置在向排禾口输送油菜茎秆时，不同的输送速度使油菜植株的角果层和茎秆层在排禾口处运动时间不同，从而产生不同铺放角度。

表 5　回归方程方差分析

Tab. 5　Analysis of variance for regression equation

来源	铺放角 Y_1				上下层铺放角度差 Y_2				铺放宽度变异系数 Y_3				铺放高度变异系数 Y_4			
	自由度	均方差	F	P	自由度	均方差	F	P	自由度	均方差	F	P	自由度	均方差	F	P
回归模型	9	21.86	21.65	0.000 3 **	9	12.25	14.09	0.001 1 **	9	46.06	36.78	<0.000 1 **	9	26.47	10.53	0.000 8 **
X_1	1	19.53	19.34	0.003 2 **	1	16.25	18.69	0.003 5 **	1	48.51	38.73	0.000 4 **	1	105.85	42.10	<0.000 1 **
X_2	1	124.82	123.63	<0.000 1 **	1	13.00	14.96	0.006 1 **	1	11.76	9.39	0.018 2 *	1	25.56	10.17	0.009 7 **
X_3	1	12.25	12.13	0.010 2 *	1	44.18	50.82	0.000 2 **	1	15.13	12.08	0.010 3 *	1	0.320 0	0.127 3	0.728 7
X_1X_2	1	1.56	1.55	0.253 5	1	9.92	11.41	0.011 8 *	1	0.122 5	0.097 8	0.763 6	1	25.50	10.14	0.009 7 **
X_1X_3	1	0.250 0	0.247 6	0.634 0	1	4.62	5.32	0.054 5	1	0.160 0	0.127 7	0.731 3	1	1.44	0.572 7	0.466 6
X_2X_3	1	6.00	5.95	0.044 9 *	1	1.32	1.52	0.257 2	1	3.61	2.88	0.133 4	1	0.160 0	0.063 6	0.805 9
X_1^2	1	24.25	24.02	0.001 8 **	1	0.000 7	0.000 8	0.978 8	1	133.82	106.84	<0.000 1 **	1	2.51	10.53	0.000 8 **
X_2^2	1	7.39	7.32	0.030 4 *	1	20.61	23.71	0.001 8 **	1	51.21	40.89	0.000 4 **	1	4.19	42.10	<0.000 1 **
X_3^2	1	2.37	2.35	0.169 5	1	0.053 3	0.061 3	0.811 6	1	116.61	93.10	<0.000 1 **	1	0.000 0	10.17	0.009 7 **
残差	7			1.01	7			0.869 3	7			1.25	7			26.47
失拟	3			2.36	3			2.03	3			2.92	3			105.85
误差	4			0	4			0	4			0	4			25.56
总和	16				16				16				16			

注：** 表示极显著（$P<0.01$），* 表示显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

由表 5 可知，对于上下层铺放角度差 Y_2，回归模型极显著（$P<0.01$），失拟值不显著（$P>0.05$），说明模型能正确反映 Y_2 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系并对试验结果进行预测。其中 X_1、X_2、X_3、X_2^2 影响极显著（$P<0.01$），X_1X_2 影响显著（$0.01\leqslant P<0.05$），其他因素影响不显著，剔除不显著因素后，铺放角度 Y_2 二次回归模型为

$$Y_2=10.3+1.42X_1-1.27X_2-2.35X_3-1.58X_1X_2+2.21X_2^2 \tag{31}$$

各因素对 Y_2 影响的贡献率分别为 $K_{Y2X1}=13.96\%$，$K_{Y2X2}=11.17\%$，$K_{Y2X3}=37.97\%$，影响由大到小为 X_3、X_1、X_2。根据图 14，当 X_3 处于 0 水平时，X_1 增大 Y_2 增大，X_2 增大 Y_2 先减小后增大，存在某一 X_2 值 Y_2 最小，响应面曲线沿 X_1 方向变化更快，说明在 X_3 中心水平下，X_1 对 Y_2 影响更为显著。原因为拨

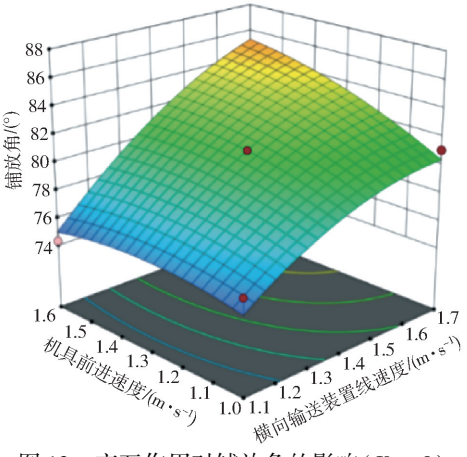


图 13 交互作用对铺放角的影响($X_1=0$)

Fig. 13 Effect of interactions on paving corners ($X_1=0$)

禾轮转速过高时，油菜植株具有较大斜抛初速度；当横向输送线速度过大或过小时，下层油菜与上层油菜会产生不同横向运动速度，从而会产生上下层铺放角度差。

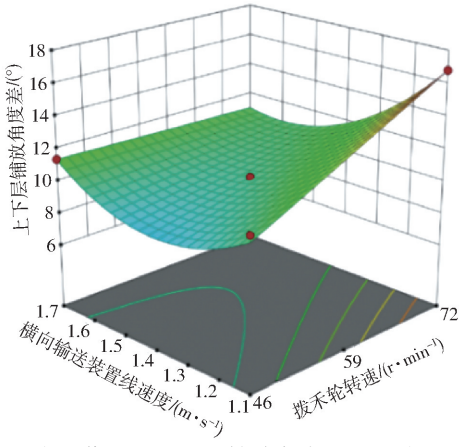


图 14 交互作用对上下层铺放角度差的影响($X_3=0$)

Fig. 14 Effect of interaction on difference in angle of upper and lower lays ($X_3=0$)

由表 5 可知，对于铺放宽度变异系数 Y_3，回归模型极显著($P<0.01$)，失拟值不显著($P>0.05$)，说明模型能正确反映 Y_3 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系并对试验结果进行预测。其中 X_1、X_1^2、X_2^2、X_3^2 影响极显著($P<0.01$)，X_2、X_3 影响显著($0.01\leqslant P<0.05$)，其余因素影响均不显著，剔除不显著因素后，铺放宽度变异系数 Y_3 二次回归模型为

$$Y_3=20-2.46X_1+1.21X_2+1.38X_3-5.64X_1^2-3.49X_2^2-5.26X_3^2 \quad (32)$$

各因素对 Y_3 影响贡献率分别为 $K_{Y3X1}=11.46\%$，$K_{Y3X2}=2.78\%$，$K_{Y3X3}=3.57\%$，影响由大到小为 X_1、X_3、X_2。交互项因素对铺放宽度变异系数影响均不显著，说明拨禾轮转速、横向输送线速度和机具前进速度会共同影响铺放宽度一致性。

由表 5 可知，对于铺放高度变异系数 Y_4，回归模型极显著($P<0.01$)，失拟值不显著($P>0.05$)，说明模型能正确反映 Y_4 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系并对试验结果进行预测。其中 X_1、X_2、X_1^2、X_2^2、X_1X_2、X_3^2 影响极显著($P<0.01$)，其他因素影响不显著，剔除不显著因素后，铺放高度变异系数 Y_4 二次回归模型为

$$Y_3=11.49-3.64X_1-1.79X_2+2.52X_1X_2-3.04X_1^2+1.55X_2^2-2.36X_3^2 \quad (33)$$

各因素对 Y_4 影响的贡献率分别为 $K_{Y4X1}=24.99\%$，$K_{Y4X2}=6.04\%$，$K_{Y4X3}=0.08\%$，影响由大到小为 X_1、X_2、X_3。根据图 15，当 X_3 处于 0 水平时，X_1 增大 Y_4 减小，X_2 增大 Y_4 减小，响应面曲线沿 X_2 方向变化更快，说明在 X_3 中心水平下，X_2 对 Y_4 影响更为显著。

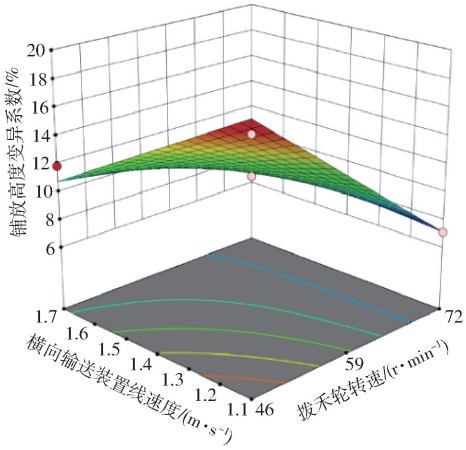


图 15 交互作用对铺放高度变异系数的影响($X_3=0$)

Fig. 15 Interact effect on coefficient of variation of height of upper and lower layers ($X_3=0$)

3.3 参数组合优化

根据油菜割晒有序铺放作业要求[34-35]，上下层铺放角度差小，铺放宽度与铺放高度一致性好，为了便于后期捡拾作业，对回归模型进行多目标优化求解，目标函数和约束条件为

$$\begin{cases}\begin{cases}\min Y_1\\ \min Y_2\\ \min Y_3\\ \min Y_4\end{cases}\\ \text{s.t.}\begin{cases}-1\leqslant X_1\leqslant 1\\ -1\leqslant X_2\leqslant 1\\ -1\leqslant X_3\leqslant 1\end{cases}\end{cases} \quad (34)$$

得优化参数组合为 x_1 为 72 r/min、x_2 为 1.66 m/s、x_3 为 1.6 m/s。综合考虑割晒机工作要求和实际加工制造水平，确定拨禾轮转速 72 r/min、横向输送装置线速度 1.6 m/s、机具前进速度 1.6 m/s。该工作参数组合下割晒机理论铺放角为 86.59°，上下层铺

放角度差为 8.1°，铺放宽度变异系数为 6%，铺放高度变异系数为 7.91%。

4　田间试验

为综合评价油菜的铺放效果和割晒机作业效率，按照所述方法检测计算油菜铺放角、铺放角度差、铺放宽度变异系数和铺放高度变异系数，并通过测量割幅计算理论作业效率，计算式为

$$P_1 = 3\,600 \times 10^{-4} B v_{m1} \tag{35}$$

式中　P_1——作业效率，m^2/h

v_{m1}——机具平均前进速度，m/s

为测试割晒损失率，试验前先收集 1 m^2 内落在地上的籽粒及落穗上的籽粒，脱粒清选干净后称量籽粒质量，共选 5 点计算平均值，记为单位面积自然落粒质量 m_0。割晒试验结束后，人工将实际割幅宽度、长度均为 1 m 面积内割倒铺放的油菜搬运走，拣起落粒、掉穗和漏割穗，脱粒清选干净后称量籽粒质量，换算为单位面积损失籽粒质量 m_1。割晒损失率 s 计算式为

$$s = \frac{m_s B L_C}{M} \times 100\% \tag{36}$$

其中

$$m_s = m_1 - m_0$$

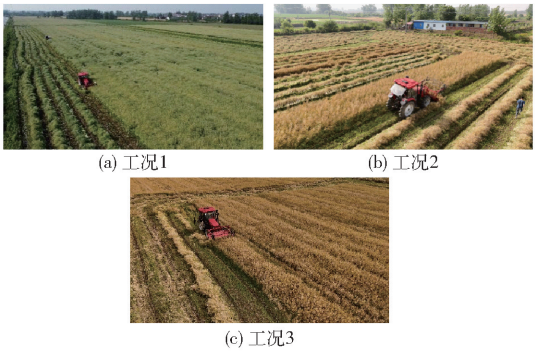
式中　m_s——单位面积实际损失量，g/m^2

L_C——测试区长度，m

M——测定区内接取籽粒总质量，g

为验证拖拉机前悬挂拨指式油菜割晒机较优参数组合与割晒铺放效果，分别于 2023 年 5 月及 2024 年 5 月在湖北省荆门市屈家岭长江中下游油菜区开展多种工况下田间作业质量检测试验，如图 16 所示。其田间工况参数如表 6 所示。作业参数为割刀离地高度 300 mm、拨禾轮转速 72 r/min、横向输送装置线速度 1.6 m/s、机具前进速度 1.6 m/s。以其参数组合下田间试验结果如表 7 所示，铺放效果如图 17 所示。

根据测试与计算，拖拉机前悬挂拨指式油菜割



(a) 工况1　(b) 工况2　(c) 工况3

图 16　割晒机田间作业

Fig. 16　Windrower field operations

表 6　试验工况参数

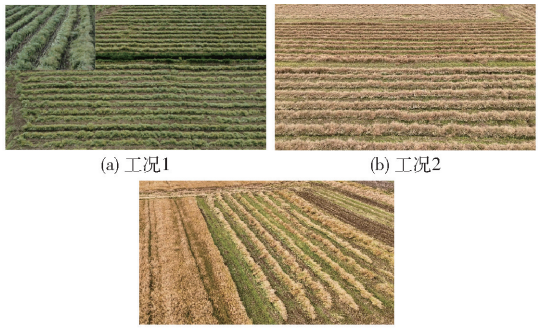
Tab. 6　Test conditions parameters

工况	密度/(株·m^{-2})	是否倒伏	株高/mm	留茬高度/mm	底荚高度/mm	割茬直径/mm
工况 1	39.3	是	1 714.3	300	973.5	14.3
工况 2	33.5	否	1 517.2	200	554.6	11.3
工况 3	31.7	否	1 023.4	200	482.5	10.9

表 7　试验结果

Tab. 7　Test results

参数	工况 1	工况 2	工况 3	国标技术要求
铺放角/(°)	80.6	84.3	74.9	90 ± 20
上下层铺放角度差/(°)	10.6	9.3	12.4	<20
铺放宽度/mm	1 313.4	1 118.0	898.4	/
铺放宽度变异系数/%	7.6	10.6	9.4	≤15
铺放高度/mm	655.5	618.4	558.4	/
铺放高度变异系数/%	8.5	6.5	12.5	≤15
作业效率/(hm^2·h^{-1})	0.72	0.84	0.68	≥0.4
割晒损失率/%	1.6	3.4	3.5	/



(a) 工况1　(b) 工况2　(c) 工况3

图 17　铺放效果

Fig. 17　Windshield laying effects

晒机能适应不同适收期、不同长势的油菜，所构建的铺放质量预测模型较为准确，铺放角度差、铺放宽度变异系数、铺放高度变异系数较小，割晒损失率低，满足油菜分段收获割晒作业的需求[34-35]。

5　结论

(1)设计一种拖拉机前悬挂链条拨指式油菜割晒机，采用斜卧式割台横向输送、侧边铺放工艺方案，通过多排链条拨指装置分别作用于油菜植株不同部位，实现油菜茎秆强制输送；不同长度的链条拨指装置形成阶梯状排禾口，实现茎秆差速排禾；茎秆受角果层重力及横向初速度在掉落时转向，实现了油菜植株有序平行铺放晾晒。

(2)利用动力学与运动学分析了油菜茎秆切割、喂入、横向输送及差速排禾运动过程，确定拖拉机前悬挂液压升降装置行程为 0 ~ 732 mm，割台倾角为 35°，横向输送装置线速度为 1.1 ~ 1.7 m/s，拨禾轮转速为 46 ~ 60 r/min。

(3)二次回归正交试验结果表明,横向输送装置线速度对铺放角度、铺放角度差、铺放宽度变异系数和铺放高度变异系数的影响均最为显著,较优参数组合为拨禾轮转速 72 r/min、横向输送装置线速度 1.66 m/s、机组前进速度 1.6 m/s。

(4)割晒机作业质量田间试验结果表明,油菜割晒机作业过程中茎秆输送顺畅、铺放有序,在较优参数组合条件下割晒油菜平均铺放角为 79.9°,上下层平均铺放角度差为 10.7°,铺放宽度变异系数为 9.2%,铺放高度变异系数为 9.1%,机具作业效率为 0.75 hm^2/h,割晒机铺放质量基本满足实际生产需求。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[2] 罗海峰, 金裕国, 童学权, 等. 油菜联合收获机割台气吹式籽粒低损回收喷嘴设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 267 - 278.
LUO Haifeng, JIN Yuguo, TONG Xuequan, et al. Design and testing of air-blown low-loss seed recovery nozzles for oilseed rape combine harvesting cutting decks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 267 - 278. (in Chinese)

[3] 金梅, 陈旭, 江涛, 等. 油菜收获时间及方法对籽粒性能的影响[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 7 - 11,151.
JIN Mei, CHEN Xu, JIANG Tao, et al. Effect of different harvesting periods and methods on rapeseed characters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 7 - 11, 151. (in Chinese)

[4] 李勤, 刘小焱, 盛紫微, 等. 我国油菜适合机械化收获关键农艺性状研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(5): 1053 - 1061.
LI Qin, LIU Xiaoyan, SHENG Ziwei, et al. Research progress on target agronomic traits for mechanized harvesting of rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45(5): 1053 - 1061. (in Chinese)

[5] 吴崇友, 肖圣元, 金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 10 - 16.
WU Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparation on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 10 - 16. (in Chinese)

[6] BOGUSTAW S, MIECZYSTAW S, JERZY T. Crop yield losses reduction at harvest, from research to adoption[M]. Springer Netherlands, 2011.

[7] 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)

[8] CHAAB R K, KARPARVARFARD S H, RAHMANIAN-KOUSHKAKI H, et al. Predicting header wheat loss in a combine harvester, a new approach[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural, 2020, 19(2): 179 - 184.

[9] DODDS M E. Observations of the performance of a self-propelled windrower[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1967(2): 70 - 75.

[10] GOSS J R, KEPNER R A, JONES L G. Hay harvesting with self-propelled windrower compared with mowing and raking[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1964(2): 357 - 361.

[11] FOSTER C A, STROSSER R P, PETERS J, et al. Automatic velocity control of a self-propelled windrower[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005, 47(1): 41 - 58.

[12] KEICHER R, SEUFERT H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2000, 25: 169 - 194.

[13] REID J F, ZHANG Qin, NOGUCHI N, et al. Agricultural automatic guidanceresearch in North America[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2000, 25: 155 - 167.

[14] 蒋亚军, 廖宜涛, 秦川, 等. 4SY - 2.9 型油菜割晒机机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 53 - 60.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY - 2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53 - 60. (in Chinese)

[15] 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 elearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 109 - 121. (in Chinese)

[16] 石增祥, 谢伟, 任述光, 等. 4SY - 2.2 型油菜割晒机设计与试验[J]. 中国农学通报, 2017, 33(10): 140 - 145.
SHI Zengxiang, XIE Wei, REN Shuguang, et al. Design and test of 4SY - 2.2 rape windrower[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(10): 140 - 145. (in Chinese)

[17] 王修善, 刘大为, 李旭, 等. 4SY - 2.0 型自走式油菜割晒机的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 445 - 453.
WANG Xiushan, LIU Dawei, LI Xu, et al. Design and experiment of 4SY - 2.0 self-propelled rape windrower[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2016, 42(4): 445 - 453. (in Chinese)

[18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京：中国农业科学技术出版社, 2007.
[19] 舒彩霞, 杨佳, 万星宇, 等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9)：34－43.
SHU Caixia, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9)：34－43. (in Chinese)
[20] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1)：236－243.
LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1)：236－243. (in Chinese)
[21] 金诚谦, 尹文庆, 吴崇友. 油菜割晒机拨指输送链式输送装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21)：11－18.
JIN Chengqian, YIN Wenqing, WU Chongyou. Development and experiment of rape windrower transportation device with poke finger conveyor chain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21)：11－18. (in Chinese)
[22] 肖霄, 罗海峰, 张贝贝, 等. 收割机拨送放铺装置研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3)：38－43.
XIAO Xiao, LUO Haifeng, ZHANG Beibei, et al. Research progress on harvester dispensing device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3)：38－43. (in Chinese)
[23] 潘国栋. 小型立台式收割机的设计原理与计算[J]. 农业机械学报, 1986, 17(2)：106－109.
PAN Guodong. Design principles and calculations of small vertical table harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1986, 17(2)：106－109. (in Chinese)
[24] 关卓怀, 江涛, 李海同, 等. 倾斜输送式油菜割晒机铺放质量分析与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4)：59－68.
GUAN Zhuohuai, JIANG Tao, LI Haitong, et al. Analysis and test of the laying quality of inclined transportation rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4)：59－68. (in Chinese)
[25] 舒彩霞, 曹士川, 廖宜涛, 等. 基于 ADAMS 的油菜割晒机顺向侧铺装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2022, 53(增刊2)：11－19,38.
SHU Caixia, CAO Shichuan, LIAO Yitao, et al. Parameter optimization and experiment of forward laying device for rape windrower based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2)：11－19, 38. (in Chinese)
[26] 金诚谦, 尹文庆, 吴崇友. 4SY－2 型油菜割晒机铺放质量数学模型与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2)：45－48.
JIN Chengqian, YIN Wenqing, WU Chongyou. Mathematical model and influencing factors analysis for windrow quality of 4SY－2 rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2)：45－48. (in Chinese)
[27] 贺小伟, 刘金秀, 徐杨, 等. 4MB－6 型密植棉秆对行铲拔铺放机改进设计[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2)：21－30.
HE Xiaowei, LlU Jinxiu, XU Yang, et al. Improvement design of 4MB－6 row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks in close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2)：21－30. (in Chinese)
[28] 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)
[29] 赵伟, 谢煜喆, 刘玉高, 等. 基于前后悬挂机具的农用拖拉机性能仿真分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2021, 38(4)：295－299.
ZHAO Wei, XIE Yuzhe, LIU Yugao, et al. Performance simulation analysis based on agricultural tractor with front and rear mounted machinery[J]. Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science), 2021, 38(4)：295－299. (in Chinese)
[30] 康艳, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜宽幅折叠式浅旋精量联合直播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8)：42－52,109.
KANG Yan, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Design and experiment of rapeseed wide-width folding shallow-rotation combined precision direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(8)：42－52,109. (in Chinese)
[31] 李运通, 万星宇, 廖庆喜, 等. 基于履带底盘的宽幅可折叠油菜割晒机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(12)：3740－3754.
Ll Yuntong, WAN Xingyu, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of wide folding rape windrower based on crawler type power chassis[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(12)：3740－3754. (in Chinese)
[32] 农业轮式拖拉机后置式三点悬挂装置 0、1N、1、2N、2、3N、3、4N 和 4 类：GB/T 1593—2015[S]. 北京：中国标准出版社, 2015.
[33] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京：中国农业科学技术出版社, 2007.
[34] 中华人民共和国发展和改革委员会. 割晒机技术：JB/T 7733—2007[S]. 北京：中国标准出版社, 2007.
[35] 农业机械推广鉴定大纲. 油菜割晒机：DG/T 307—2024[S]. 北京：中华人民共和国农业农村部, 2024.