

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.002

基于 ADAMS 的油菜割晒机顺向侧铺装置参数优化与试验

舒彩霞^{1,2} 曹士川¹ 廖宜涛^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 万星宇¹ 李运通¹

(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: 针对常规立式油菜割晒机多采用侧边铺放方式, 茎秆铺放方向与机组前进方向垂直, 油菜茎秆铺放角差异大、姿态各异, 易导致后续捡拾作业喂入量波动和捡拾不彻底等现实问题, 提出了一种油菜割晒机顺向侧铺装置, 分析了关键部件作业参数, 基于 ADAMS 开展了铺放质量的仿真优化试验。利用运动学与动力学分析了割台排禾口处茎秆的平抛运动过程及其落地后的定轴转动过程, 结合茎秆铺放角形成机理, 计算得出拨禾星轮齿数为 7、转动角速度为 6.27 rad/s, 确定了排禾导向板曲线参数方程; 基于 ADAMS 构建了油菜茎秆顺向侧铺装置的多体运动学仿真模型, 以机组前进速度、横向输送链速比、割台倾角为因素, 以茎秆铺放角为评价指标, 开展了 Box - Behnken 仿真试验, 以铺放角最小为目标构建了优化目标函数, 运用 Design-Expert 软件求解得到最佳参数组合并开展了仿真和田间验证试验。Box - Behnken 试验结果表明, 最佳参数组合为机组前进速度 0.93 m/s、横向输送链速比 1.11、割台倾角 117.93°, 理论最优铺放角为 15.25°。仿真验证试验结果表明, 在最佳参数组合条件下, 铺放角仿真值为 14.42°, 与理论值相对误差为 5.4%。田间试验结果表明, 油菜顺向侧铺装置作业顺畅、无堵塞, 油菜茎秆平均铺放角为 17.25°、平均铺放宽度为 752 mm、平均铺放层高度为 323 mm, 可满足实际生产需求。该研究可为立式油菜割晒机铺放装置结构改进和优化提供参考。

关键词: 油菜; 割晒机; 顺向侧铺; ADAMS; 参数优化

中图分类号: S225.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0011-09

Parameter Optimization and Experiment of Forward Laying Device for Rape Windrower Based on ADAMS

SHU Caixia^{1,2} CAO Shichuan¹ LIAO Yitao^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} WAN Xingyu¹ LI Yuntong¹

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

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

Abstract: The conventional vertical rape windrower, whose laying direction of the rape plants is perpendicular to the forward direction of the windrower, still has the challenge to guarantee stable feeding rate of the following pick-up operation due to the inconsistent laying angle, highlighting a need to change the way of laying. As a solution, a forward laying device for rape windrower, whose operation parameters were analyzed, was proposed and the simulation experiments was carried out to optimize the laying quality based on ADAMS. Focusing on the moving of the rape plant at the outlet of the header, the horizontal throwing movement of the plant and its following fixed axis rotation after landing at the ground were analyzed based on kinematics and dynamics, indicating that the laying angle was related to the initial velocity and fixed axis rotation time of the plant. It was found that the main factors affecting the laying quality were forward speed of the windrower, speed ratio of transverse conveyor chain, and inclination angle of the header. Furthermore, the laying process under the coordination of the wheel and the guide plate was analyzed. The number of wheel teeth was 7 while the rotational angular velocity was 6.27 rad/s. In addition, the curve parameter equation of the guide plate was also determined, and a four-bar mechanism was designed. Based on ADAMS, a multi-body kinematic simulation model of the forward laying device was constructed. By taking the forward speed of the windrower, transverse transmission chain speed ratio and inclination angle of the header as factors, the laying angle was utilized to evaluate

收稿日期: 2022-06-20 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075210)和中国博士后科学基金项目(2020M682438)

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

the laying quality in the Box - Behnken simulation experiment with three factors and three levels. The mathematical relationship model between the laying angle and every factor was obtained to figure out the optimization objective function to minimize the laying angle. With the assistance of the Design-Expert software, the optimal parameter combination was obtained, and then it was validated by simulation and field experiment. The results of the Box - Behnken experiment indicated that the optimal parameter combination was forward speed of 0.93 m/s, transverse conveying chain speed ratio of 1.11, and inclination angle of 117.93°. The theoretical optimal laying angle was 15.25° under this condition. The results of the simulation experiment illustrated that the simulation value of laying angle was 14.42° under the optimal combination of parameters, and the relative error was 5.4% when compared with the theoretical value. The field experiment showed that the forward laying device could work smoothly without blockage. The average laying angle, average laying width and average laying height were 17.25°, 752 mm and 323 mm, respectively, which could meet the demand of actual production. The research could provide a reference for the structural improvement and optimization of the laying device for vertical rape windrower.

Key words: rapeseed; windrower; forward laying; ADAMS; parameter optimization

0 引言

油菜提供我国 50% 以上食用植物油,且不与水稻、玉米等主要粮食争地,是我国最具种植潜力的油料作物,约 85% 种植于长江中下游冬油菜产区^[1-3]。油菜机械化收获是油菜全程机械化生产的关键环节,但 2020 年油菜机械化收获水平仅为 48.55%,油菜机械化水平不足制约了油菜产业发展^[4-8]。油菜机械化割晒是油菜机械化收获的主要方式之一,将油菜割倒后晾晒一段时间再捡拾脱粒,充分利用油菜后熟作用,具有收获后损失少、籽粒饱满、成熟度一致等优点^[9-12],油菜铺放质量是影响后续捡拾脱粒作业效果的关键。

长江中下游油菜产区多为丘陵山区,不利于大型割晒装备应用^[6,10,12],适宜于丘陵山区小田块作业的油菜割晒装备以小型立式割晒机为主,一般采用横向侧面铺放方式,茎秆铺放方向与机组前进方向垂直^[10,12]。国内外学者为提高油菜侧边铺放质量,主要围绕铺放装置结构改进^[13-15]、铺放角形成机理^[16-20]、割晒机参数匹配^[12-13,15]等方面开展研究。在铺放装置结构改进方面,倾斜输送带^[13-14]、横向输送链^[12]、横向输送带与立辊组合式输送装置^[15,19,21-22]等均可应用于油菜输送铺放,通过优化油菜茎秆输送线速度与姿态等方式提高输送效率和铺放质量;在铺放角形成机理方面,多采用动力学与运动学分析探究油菜茎秆在铺放装置约束下的运动规律^[16,18],明确了影响铺放质量的主要因素,结合 Matlab 等提取油菜茎秆迁移和机构运动轨迹,应用 ANSYS、ADAMS、EDEM 等仿真模拟软件构建油菜茎秆与铺放装置互作关系模型^[17,21-22],可视化油菜茎秆由排禾口排出至落地铺放过程中的茎秆姿态变化规律,探究了油菜铺放角形成机理;在割晒机参数

匹配方面,通过台架试验、仿真试验、田间试验等方式,可构建铺放角、铺放宽度等与机组前进速度、铺放装置结构和运行参数等的数学关系模型,通过多目标优化方法明确油菜割晒机最佳参数组合^[13-16]。因油菜植株高大、茎秆粗壮、分枝众多且相互缠绕等生物学特性特殊,横向侧铺方式仍存在油菜茎秆铺放角差异大、姿态各异,易导致后续捡拾作业喂入量波动和捡拾不彻底等现实问题。

针对上述问题,本文提出一种油菜割晒机顺向侧铺装置,通过横向输送链将切割后的油菜茎秆输送至排禾口,排禾口处拨禾星轮与导向板配合,迫使茎秆转向后顺向铺放,实现茎秆铺放方向与机组前进方向基本一致;利用运动学与动力学分析茎秆铺放过程,阐明影响铺放质量的关键因素及其水平范围;基于 ADAMS 构建油菜茎秆顺向侧铺装置多体运动学仿真模型,开展铺放质量的仿真优化试验,求解得到最佳参数组合并开展仿真和田间验证试验。

1 油菜割晒机总体结构与工作过程

1.1 总体结构

自主研发的手扶式顺向侧铺油菜割晒机关键部件包括手扶式履带动力底盘、割台、割台调节四杆机构等组成,如图 1 所示,其中割台由分禾装置、切割装置、顺向侧铺装置等组成,割台倾角和留茬高度可由割台调节四杆机构调节,顺向侧铺装置由横向输送链、排禾导向板、拨禾星轮等组成。割晒机主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作过程

顺向侧铺油菜割晒机工作过程主要包括分禾切割、横向输送和顺向排禾,如图 2 所示。

分禾切割:割晒机作业时,割台侧边竖割刀将油菜分枝切断,分禾装置将油菜主茎导向割台切割装

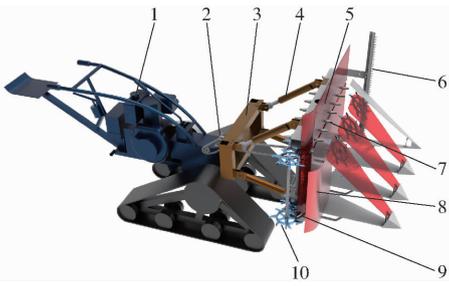


图 1 手扶式顺向侧铺油菜割晒机结构示意图
Fig.1 Structure diagram of forward and side laying rape windrower

- 1.履带动力底盘 2.传动系统 3.调节四杆机构 4.可调连杆
- 5.顺向侧铺装置 6.分禾装置 7.横向输送链 8.排禾导向板
- 9.切割装置 10.拨禾星轮

表 1 油菜割晒机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of rape windrower

参数	数值
配套动力/kW	10
横向输送速比	1.0 ~ 1.2
作业幅宽/mm	10 000
割茬高度/mm	300 ~ 400
转弯半径/mm	820
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.6 ~ 1.0
生产效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.23 ~ 0.39

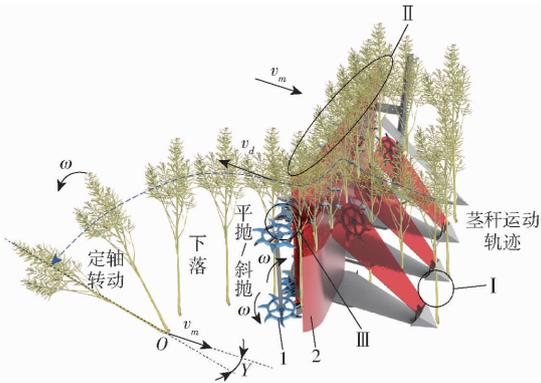


图 2 割晒机工作过程示意图

Fig.2 Schematic of operation of windrower

- 1.拨禾星轮 2.排禾导向板 I.分禾切割 II.横向输送 III.顺向排禾

置,切割装置刀片往复运动将茎秆切断。

横向输送:切断后的油菜植株被输送至横向输送链,在双层输送链与排禾导向板共同夹持下有序地向机具侧边输送。

顺向排禾:油菜植株输送至排禾口处后,在排禾星轮拨禾与排禾导向板导向曲面的作用下,植株运动方向改变,由横向运动变为顺向抛出。

顺向铺放装置采用双层输送链,每层采用两个拨禾星轮实现茎秆的顺向抛送,两个拨禾星轮水平布置;当割台倾角为 90°时,茎秆抛出后做平抛运动,当割台倾角大于 90°时,则为斜抛运动;抛出后

的油菜茎秆由于重力向下掉落,不考虑茎秆碰撞弹跳的条件下,当下落至茎秆底部接触地面后变为定轴转动,茎秆角果层倾倒后依次铺放于地面,完成顺向侧铺。

2 关键部件设计与参数分析

2.1 顺向铺放质量因素分析

由割晒机工作过程可知,茎秆由排禾口排出后的无约束运动过程是影响铺放质量的关键。当割台倾角为 90°且不考虑茎秆之间牵扯力的条件下,在油菜茎秆刚脱离排禾口时,排禾口拨禾星轮对油菜茎秆有一个水平面上的初速度 v_s ,其大小与横向输送速度 v_d 相等,与横向输送速度存在一定夹角 θ ,如图 3 所示。

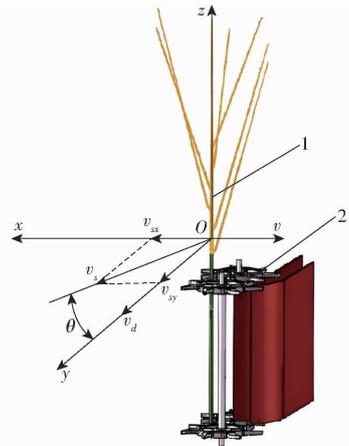


图 3 排禾平抛运动示意图

Fig.3 Schematic of discharge device

- 1.油菜茎秆 2.顺向侧铺装置

由图 3 可知,油菜茎秆绝对速度计算式为

$$\begin{cases} v_{sx} = v_s \sin \theta - v_m = v_d \sin \theta - v_m \\ v_{sy} = v_s \cos \theta = v_d \cos \theta \\ v_s = gt_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_{sx} ——油菜茎秆前进方向分速度, m/s

v_{sy} ——油菜茎秆横向分速度, m/s

v_d ——横向速度, m/s

v_m ——机组前进速度, m/s

g ——重力加速度,取 9.81 m/s²

t_1 ——茎秆下落至茎秆底部触地时间, s

茎秆平抛落地过程中,忽略空气阻力,则茎秆下落时间 t_1 为

$$t_1 = \left(\frac{2h_l}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 h_l ——留茬高度,取 300 ~ 400 mm

计算得 t_1 为 0.25 ~ 0.28 s。

假设茎秆底部落地后不发生弹跳并以接触点为原点做定轴转动,则铺放角形成过程如图 4 所示。

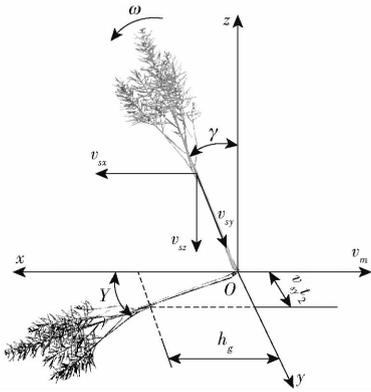


图4 油菜茎秆定轴转动过程分析

Fig.4 Rotation process of rape stalk fixed axis

根据能量守恒定理,油菜下落过程中的重力势能转换为动能,油菜茎秆绕 y 轴转动角速度 ω 为

$$\omega = \left[\frac{2mgh_g + m(v_{xx}^2 + v_{zz}^2)}{J_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 J_0 ——油菜茎秆转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

ω ——油菜茎秆角速度, rad/s

m ——油菜茎秆质量, kg

h_g ——油菜茎秆质心高度, m

v_{zz} ——油菜茎秆竖直方向分速度, m/s

当割台倾角大于 90° 时,油菜茎秆做斜抛运动,油菜茎秆脱离割台时有一个向下的速度分量 v_{zz} ,相对于平抛运动,油菜茎秆在脱离割台后到底端落地的时间 t_1 较小,计算式为

$$\frac{1}{2}gt_1^2 + v_{zz}t_1 = h_l \quad (4)$$

油菜茎秆的铺放角 Y 与沿 y 轴方向的速度分量 v_{yy} 有关,即

$$Y = \arctan \frac{v_{yy}t_2}{h_g} \quad (5)$$

式中 t_2 ——油菜茎秆定轴转动时间, s

油菜茎秆底端落地时,理论上油菜茎秆相对于平抛运动落地时保持一定的倾角 γ ,此时油菜茎秆做定轴转动的的时间 t_2 减小,油菜茎秆在 v_{yy} 方向上的位移随之减小,油菜茎秆铺放角就越小。茎秆落地后倾角 γ 满足

$$\frac{1}{2}J_0\omega^2 = mgh_g \sin\gamma + \frac{1}{2}m(v_{xx}^2 + v_{zz}^2) \quad (6)$$

由式(6)可知,通过减小油菜茎秆脱离割台后速度 v_{yy} 或者减小油菜茎秆做定轴转动的的时间 t_2 可减小铺放角,提高铺放质量;影响茎秆铺放质量的主要因素为机组前进速度、横向输送链速比和割台倾角。在此基础上,将通过设计排禾导向板的曲率减小 v_{yy} ,通过调节机组前进速度、横向输送速比等运行参数及割台倾角等结构参数缩短 t_2 。

2.2 割台调节四杆机构设计

连接割台与动力底盘的四杆机构是调节割台高度和割台倾角的关键,包括动力底盘的悬挂连杆 AB 、上部长度可调连杆 BC 、下部角度可调连杆 AD 及割台悬挂连杆 CD ,如图5所示,其中 AB 、 CD 、 AD 长度固定,为避免机架与横向输送链发生干涉,分别取为 220、420、350 mm,杆 BC 设有多个安装孔,长度可调但倾斜角不变。通过改变连杆 BC 、 AD 长度及安装角度即可实现割台姿态的调节,确定连杆参数后通过螺栓紧固连接形成固定副,保证作业过程中割台倾角和割台高度固定不变。

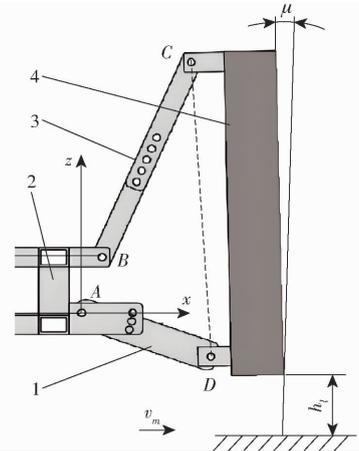


图5 可调四杆机构结构示意图

Fig.5 Structure diagram of adjustable four bar mechanism

1. 角度可调连杆 AD
2. 底盘悬挂连杆 AB
3. 长度可调连杆 BC
4. 割台悬挂连杆 CD

当连杆 BC 最长或最短时,四杆机构处于临界状态,如图6所示。根据整机设计要求,油菜割晒机倾角与割台离地高度范围分别为 $90^\circ \sim 120^\circ$ 和 $300 \sim 400 \text{ mm}$,即在连杆 BC 最长时的临界状态(图6a),割台倾角为 90° ,割台高度为 400 mm ,在连杆 BC 最短时的临界状态(图6b),割台倾角为 120° ,割台高度为 300 mm 。

由图6a可知

$$l_4 \cos \varepsilon_{\max} = l_{2\max} \cos \psi \quad (7)$$

式中 l_4 ——连杆 AD 长度, mm

ε_{\max} ——连杆 AD 可调最大角度, $(^\circ)$

$l_{2\max}$ ——连杆 BC 最大长度, mm

ψ ——连杆 BC 角度, $(^\circ)$

由图6b可知

$$\begin{cases} l_3 \sin 30^\circ + l_{2\min} \cos \psi = l_4 \cos \varepsilon_{\min} \\ \sin \varepsilon_{\min} = \frac{\Delta h}{2l_4} \end{cases} \quad (8)$$

式中 l_3 ——连杆 CD 长度, mm

ε_{\min} ——连杆 AD 可调最小角度, $(^\circ)$

$l_{2\min}$ ——连杆 BC 最小长度, mm

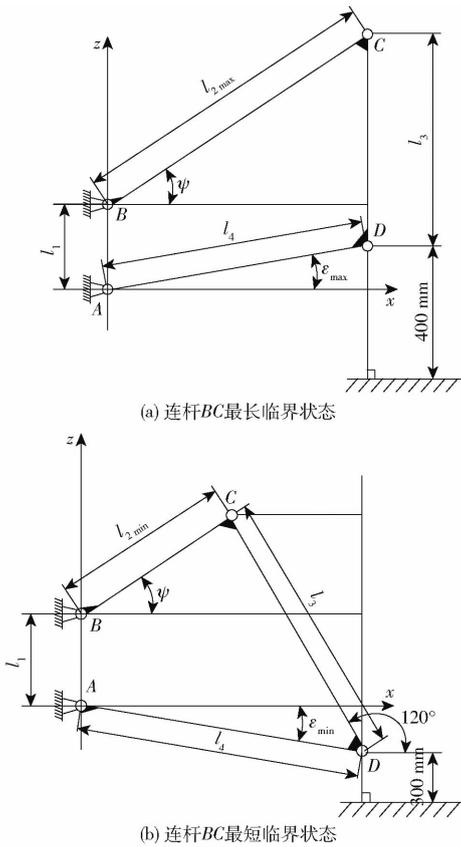


图 6 四杆机构临界位置示意图

Fig. 6 Schematics of limit position of mechanism

Δh ——割台升降高度差,取 100 mm

为满足割台倾角在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 可调,留茬高度在 300 ~ 400 mm 可调,得连杆 AD 调节角为 $-8.2^\circ \sim 8.2^\circ$,连杆 BC 长度取值范围为 126 ~ 426 mm。

2.3 顺向侧铺装置设计与参数分析

2.3.1 拨禾星轮齿数

顺向侧铺装置是实现油菜茎秆由横向移动转换为顺向运动的关键,其中对置拨禾星轮与横向输送链的拨指相互配合,使油菜植株的迁移轨迹由横向移动转变为纵向移动,尽可能减小铺放角以便后续捡拾脱粒作业,如图 7 所示;此外,拨禾星轮和排禾导向板相互配合,使油菜茎秆在方向转变后保持与机组前进方向平行。拨禾星轮齿廓线采用圆弧齿廓,如图 7b 所示,当拨禾星轮与横向输送链相互配合做回转运动时,两个对置拨禾星轮齿面接触为线接触,可使拨禾星轮保持转速稳定且增加对置拨禾星轮齿面接触时间。

当横向输送链拨指转动时,若拨禾星轮齿数选择不当,则导致拨禾星轮轮齿与拨指位置出现偏差,对油菜茎秆在排禾口转变运动过程产生扰动,影响铺放质量,故拨禾星轮相邻两齿夹角 θ_1 与拨禾星轮齿数应满足关系

$$z = \frac{2\pi}{\theta_1} \quad (9)$$

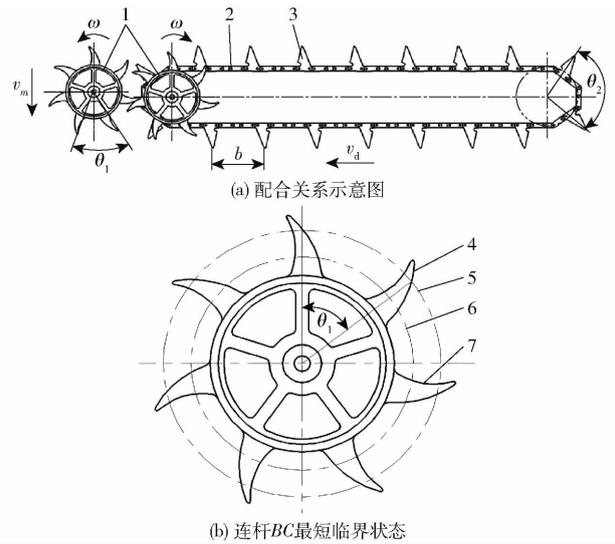


图 7 拨禾星轮与横向输送链配合关系

Fig. 7 Matching relation between rotary wheel and transverse conveyor chain

- 1. 拨禾星轮 2. 横向输送链 3. 拨指 4. 齿面轮廓 5. 齿背曲率中心圆 6. 齿面曲率中心圆 7. 齿背轮廓

式中 z ——拨禾星轮齿数

带拨指输送链在绕链轮转动阶段,可以将其视为定轴转动,相邻两个拨指到链轮中心连线的夹角 θ_2 为

$$\theta_2 = \frac{b}{r_1} \quad (10)$$

式中 b ——横向输送链两拨指之间的距离,mm

r_1 ——链轮分度圆半径,mm

为使横向输送链拨指和拨禾星轮轮齿不发生偏移,则 θ_2 应为 θ_1 的整数倍,结合割晒机实际尺寸,取 θ_2 为 θ_1 的 2 倍,计算得拨禾星轮齿数为 7。

2.3.2 排禾导向板轮廓曲线分析

排禾导向板可为油菜茎秆输送过程施加约束,使油菜茎秆在横向输送结束后,可在拨禾星轮的作用下转变茎秆运动方向,形成顺向侧铺。排禾导向板轮廓曲线是实现茎秆导向的关键,适宜的轮廓曲线可减少导向板约束下拨禾星轮对油菜茎秆的剪切作用;同时通过控制拨禾星轮和排禾导向板的夹角,可使油菜茎秆在脱离割台时产生垂直于横向输送链方向的初速度,有利于实现顺向侧铺。

拨禾星轮和排禾导向板相互配合时,以油菜茎秆截面中心为质心,油菜茎秆在拨禾星轮齿面廓线和排禾导向板作用下速度分析如图 8 所示。

拨禾星轮齿面轮廓对油菜茎秆的速度为 v_a ,排禾导向板对油菜茎秆施加的速度为 v_b ,排禾导向板曲率需使得两个速度矢量和方向与机组前进速度方向相反,即

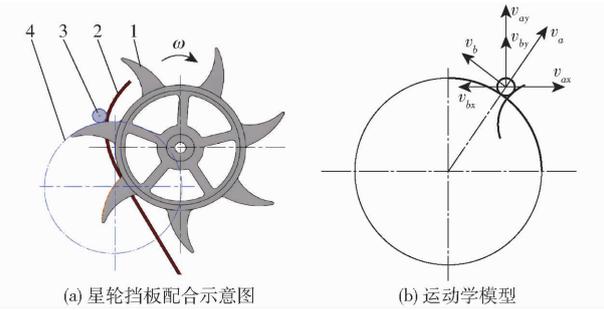


图8 排禾过程茎秆运动分析

Fig.8 Analysis of stem movement during laying process

1. 齿面圆弧轮廓线 2. 排禾导向板 3. 油菜茎秆 4. 齿面轮廓圆

$$\begin{cases} v_{ax} = -v_{bx} \\ v_x = 0 \\ v_y = -v_{ay} - v_{by} \end{cases} \quad (11)$$

式中 v_{ax} ——拨禾星轮齿面轮廓对油菜茎秆的速度沿机组前进方向分速度, m/s

v_{ay} ——拨禾星轮齿面轮廓对油菜茎秆的速度沿垂直机组前进方向分速度, m/s

v_{bx} ——排禾导向板对油菜茎秆的速度沿机组前进方向分速度, m/s

v_{by} ——排禾导向板对油菜茎秆的速度沿垂直机组前进方向分速度, m/s

油菜茎秆运动方向由垂直于前进速度的方向转变为与前进速度相反的方向,理论上运动方向转变了 90° ,排禾导向板与拨禾星轮轮齿相互配合下导向角度也应为 90° ,如图9所示。茎秆运动时在第2象限内实现转向,重点开展此象限内排禾导向板轮廓曲线的分析。

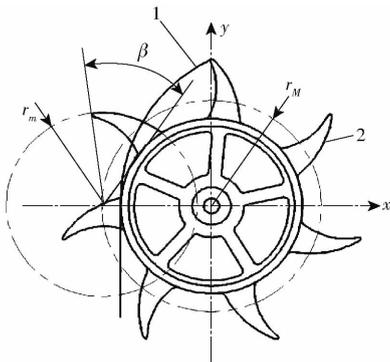


图9 排禾导向板轮廓曲线示意图

Fig.9 Outline curves of baffle plate

1. 排禾导向板 2. 拨禾星轮

排禾导向板曲线可由牵连运动与相对运动合成:①牵连运动:以拨禾星轮为动系,其运动为定轴转动,运动轨迹为齿面曲率中心点所在的圆上。②相对运动:动点绕齿面廓线曲率中心的定轴转动,运动轨迹在齿面廓线上。排禾导向板曲线参数方程为

$$\begin{cases} x = r_M \cos(\alpha + \theta_3) - r_m \cos(\beta + \varphi) \\ y = r_M \sin(\alpha + \theta_3) - r_m \sin(\beta + \varphi) \end{cases} \quad (12)$$

式中 x ——挡板曲线 x 轴坐标

y ——挡板曲线 y 轴坐标

r_M ——拨禾星轮齿面廓线曲率中心点所在的圆半径, mm

r_m ——拨禾星轮齿面廓线曲率半径, mm

α ——排禾导向板与拨禾星轮轮齿相互配合角度, rad

β ——齿面廓线对应的圆心角, rad

θ_3 ——牵连运动初始相位角, rad

φ ——相对运动初始相位角, rad

在实际收获过程中,拨禾星轮转速恒定,即对应 α 的一阶导数是固定值,挡板曲率方程中 β 取一阶导数为常数,其相对运动转速是一个定值,其角速度为

$$\omega_0 = \frac{\alpha c v_m}{\beta r_M} \quad (13)$$

式中 ω_0 ——相对运动角速度, rad/s

c ——横向输送速比

在转动运动过程中,拨禾星轮的轮齿在一个工作循环内,牵连运动转动角 β ,在相同时间内,相对运动转过角 α ,拨禾星轮的转速和横向输送速度成正比,计算得 ω_0 为6.27 rad/s。

3 基于 ADAMS 的顺向铺放仿真试验

油菜茎秆的顺向排禾过程的运动学与动力学分析结果表明,影响茎秆铺放质量的主要因素为机组前进速度、横向输送链速比和割台倾角。在此基础上,进一步分析了顺向侧铺装置拨禾星轮、横向输送链、排禾导向板等关键部件之间的互作关系,确定了拨禾星轮齿数、排禾导向板曲面参数等结构参数以及拨禾星轮转速等运行参数,仍需进一步探究机组前进速度、横向输送链速比和割台倾角对割晒机铺放质量的影响。综合考虑实际作业过程中作业参数难以精确控制,故基于 ADAMS 构建茎秆顺向侧铺仿真模型,开展 Box - Behnken 仿真试验以确定最佳参数组合。

3.1 模型建立

油菜茎秆力学模型建立参照文献[17],顺向侧铺装置的构件默认为刚体,在顺向侧铺装置与地面之间添加移动副,可调节侧铺装置前进速度;拨禾星轮与星轮轴之间添加转动副,对置拨禾星轮之间定义接触,可实现拨禾星轮对向转动并调节横向输送链速比;通过设置重力方向表征不同割台倾角,仿真模型如图10所示。

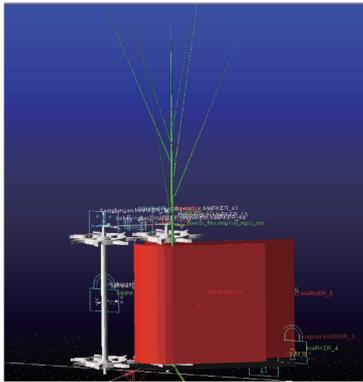


图 10 顺向侧铺装置仿真模型

Fig. 10 Simulation model of forward laying device

3.2 试验因素与评价指标

以机组前进速度 X_1 、横向输送速度与机组前进速度的输送速比 X_2 、割台倾角 X_3 为试验因素，以油菜主茎秆与机组前进速度方向形成的铺放角 Y 为评价指标进行仿真试验，因素水平编码表如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Test factors and coding

编码	因素		
	前进速度 X_1 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	输送速比 X_2	割台倾角 X_3 / ($^\circ$)
-1	0.6	1.0	90
0	0.8	1.1	105
1	1.0	1.2	120

为了获取作业完成后的油菜铺放角，定义机组前进速度方向为 ADAMS 中坐标轴 x 轴的正方向，重力方向为 z 轴的反方向，横向输送速度为 y 轴的反方向。设地面距顺向侧铺装置的距离为 300 mm，在油菜植株主茎秆上设置两个标记点 P_1 、 P_2 ，如图 11 所示。

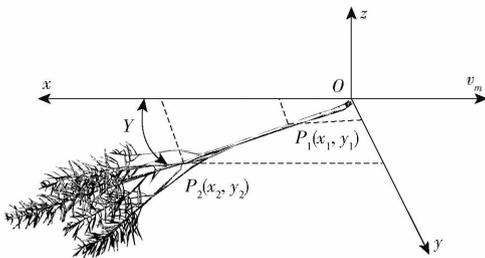


图 11 铺放角测量

Fig. 11 Measuring of laying angle

待仿真试验完成后，导出油菜主茎秆标记点的坐标，则油菜植株铺放角为

$$Y = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (14)$$

式中 Y ——铺放角，($^\circ$)

x_1, x_2 ——标记点横坐标

y_1, y_2 ——标记点纵坐标

3.3 试验结果与分析

仿真试验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果

Tab. 3 Experiment results

序号	因素			铺放角 Y / ($^\circ$)
	前进速度 X_1 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	输送速比 X_2	割台倾角 X_3 / ($^\circ$)	
1	0.6	1.0	105	27.34
2	1.0	1.0	105	18.82
3	0.6	1.2	105	18.04
4	1.0	1.2	105	18.01
5	0.6	1.1	90	21.96
6	1.0	1.1	90	24.24
7	0.6	1.1	120	22.36
8	1.0	1.1	120	15.36
9	0.8	1.0	90	24.68
10	0.8	1.2	90	17.52
11	0.8	1.0	120	20.36
12	0.8	1.2	120	17.09
13	0.8	1.1	105	17.14
14	0.8	1.1	105	15.26
15	0.8	1.1	105	17.03
16	0.8	1.1	105	16.94
17	0.8	1.1	105	16.93

对表 3 数据进行回归分析，得出铺放角 Y 关于前进速度 X_1 、横向输送速比 X_2 和割台倾角 X_3 二次回归模型为

$$Y = 467.17875 - 143.03125X_1 - 489.40000X_2 - 1.92208X_3 + 106.12500X_1X_2 - 0.77333X_1X_3 + 0.64833X_2X_3 + 62.00000X_1^2 + 141.25000X_2^2 - 0.00818X_3^2$$

回归方程进行方差分析如表 4 所示。模型 F 值为 24.86，回归方程显著性水平 P 值小于 0.001，表明铺放角回归模型显著，与试验值拟合程度较好。模型失拟项 P 值为 0.2666 > 0.05，说明所得回归方程与实际拟合中非正常的误差所占比例小，即试验误差较小。去除不显著因素，得到铺放角 Y 回归方程为

$$Y = 467.17875 - 143.03125X_1 - 489.40000X_2 - 1.92208X_3 + 106.12500X_1X_2 - 0.77333X_1X_3 + 62.00000X_1^2 + 141.25000X_2^2 - 0.00818X_3^2$$

试验结果表明，各因素对铺放角的影响由大到小依次为输送速比、前进速度、割台倾角；割晒机前进时，前进速度和输送速比越大，导致油菜茎秆的惯性力增大，转向运动时，运动方向变化增大，即铺放角越大；当割台倾角增大时，油菜茎秆脱离割台时与地面的角度越小，在油菜茎秆根部接触地面之后，其与地面之间的定轴转动时间越短，即偏离前进速

表4 铺放角方差分析

Tab.4 Analysis of variance of laying angle

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	193.82	9	24.86	0.0002**
X_1	22.01	1	25.41	0.0015**
X_2	52.74	1	60.88	0.0001**
X_3	21.88	1	25.26	0.0015**
X_1X_2	18.02	1	20.80	0.0026**
X_1X_3	21.53	1	24.85	0.0016**
X_2X_3	3.78	1	4.37	0.0750
X_1^2	25.90	1	29.89	0.0009**
X_2^2	8.40	1	9.70	0.0170*
X_3^2	14.26	1	16.46	0.0048**
残差	6.06	7		
失拟	3.59	3	1.93	0.2666
误差	2.48	4		
总和	199.88	16		
R^2	0.6936			
调整 R^2	0.9307			

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

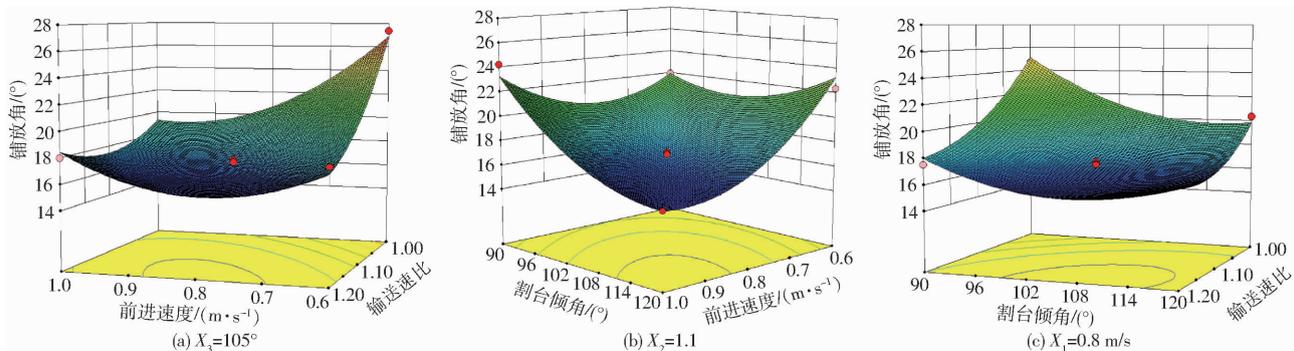


图12 交互作用对铺放角的影响

Fig.12 Influence of interaction on laying angle

小;输送速比和割台倾角对铺放角的交互作用不显著。

3.4 最优参数组合与验证

为明确油菜割晒机最佳参数组合,以最小铺放角为优化目标,以各因素水平范围为约束条件,建立优化模型

$$\begin{cases} \min Y = (X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.6 \text{ m/s} \leq X_1 \leq 1.0 \text{ m/s} \\ 1.0 \leq X_2 \leq 1.2 \\ 90^\circ \leq X_3 \leq 120^\circ \end{cases} \end{cases}$$

求得最佳参数组合为前进速度 0.93 m/s、输送速比 1.11、割台倾角 117.93°,理论最优铺放角为 15.25°。

为验证最优解准确性,在 ADAMS 中以最优参数组合进行试验验证,仿真所得铺放角为 14.42°,与理论最优铺放角相对误差为 5.4%,与理论值基本一致。

为进一步验证顺向侧铺油菜割晒机田间作业性

度方向上的运动时间越短,铺放角越小。

为探究回归方程中各因素的交互作用,利用 Design-Expert 软件建立机组前进速度、横向输送速度与机组前进速度的速比和割台倾角的交互因素对铺放角的响应面曲线,结果如图 12 所示。

由图 12a 可知,在前进速度一定时,随着输送速比增大,铺放角先减小后增大;在输送速比一定时,随着前进速度的增大,铺放角先减小后增大;前进速度和输送速比的交互作用显著。

由图 12b 可知,在前进速度一定时,随着割台倾角的增大,铺放角先减小后增大;在割台倾角一定时,随着前进速度的增大,铺放角先减小后增大;前进速度和割台倾角对铺放角的交互作用显著。

由图 12c 可知,在输送速比一定时,割台倾角越大,铺放角减小,随着输送速比的增大,铺放角的变化率越小;在割台倾角一定时,输送速比越大,铺放角就越小,随着割台倾角的增大,铺放角的变化率越

能,于 2022 年 4 月在华中农业大学现代农业试验基地开展田间功能性试验,如图 13 所示。试验对象为果荚期油菜,种植密度为 27 ~ 30 株/m²。试验前调节割晒机底盘挡位、齿轮箱传动比和四杆机构连杆长度,设置输送速比、割台倾角分别为 1.1 和 118°,割台高度设置为 300 mm,均保持在各部件运行参数范围内。试验过程中,控制机组前进速度为 0.9 m/s。



图13 割晒机田间试验

Fig.13 Field experiment of windrower

试验结果表明,手扶式顺向侧铺油菜割晒机可实现顺向铺放功能,平均铺放角为 17.25°,平均铺

放宽度和铺放层高度分别为 752 mm 和 323 mm; 实测铺放角与仿真试验所得最小铺放角的相对误差为 13.2%, 作业顺畅、无堵塞。

4 结论

(1) 针对常规侧边铺放割晒机铺放角差异大、姿态各异, 易导致后续捡拾作业喂入量波动和捡拾不彻底等现实问题, 提出了一种油菜割晒机顺向侧铺装置, 在排禾星轮拨禾与排禾导向板导向曲面的作用下, 使油菜植株运动方向由横向转变为顺向抛出, 完成顺向侧铺。

(2) 分析了割台排禾口处茎秆的平抛运动过程及其落地后的定轴转动过程, 明确了影响影响茎秆铺

放质量的主要因素为机组前进速度、横向输送链速比和割台倾角, 结合拨禾星轮与排禾导向板配合下的排禾过程分析, 确定了拨禾星轮齿数为 7, 转动角速度为 6.27 rad/s, 建立了排禾导向板曲线参数方程。

(3) 基于 ADAMS 开展了 Box - Behnken 试验仿真试验, 以铺放角最小得出了顺向铺放装置最佳参数组合为前进速度 0.93 m/s、输送速比 1.11、割台倾角 117.93°, 在最佳参数组合条件下, 铺放角仿真值为 14.42°, 与理论最优值相对误差为 5.4%。

(4) 油菜割晒机田间功能性试验结果表明, 顺向铺放装置运行顺畅、无堵塞, 油菜铺放平均铺放角为 17.25°、铺放宽度为 752 mm、铺放层高度为 323 mm, 可实现顺向侧铺功能。

参 考 文 献

- [1] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485 - 489.
LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development status, potential and countermeasures of rape industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2019, 41(4): 485 - 489. (in Chinese)
- [2] 王佳友, 何秀荣, 王茵. 中国油脂油料进口替代关系的计量经济研究[J]. 统计与信息论坛, 2017, 32(5): 69 - 75.
WANG Jiayou, HE Xiurong, WANG Yin. Econometric study on the substitution relationship between oil and oil import in China[J]. Statistics and Information Forum, 2017, 32(5): 69 - 75. (in Chinese)
- [3] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613 - 617.
WANG Hanzhong. Rape industry development strategy guided by new demand[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2018, 40(5): 613 - 617. (in Chinese)
- [4] WAN Xingyu, LIAO Qingxi, JIANG Yajun, et al. Cattle feeding experiment and chopping device parameter determination for mechanized harvesting of forage rape crop[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(2): 715 - 725.
- [5] 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. Research status and development trend of mechanized and intelligent key technology and equipment in the whole rape industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24 - 44. (in Chinese)
- [6] 张敏, 金梅, 王刚, 等. 油菜割晒机双曲柄平面五杆拨禾轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 115 - 122.
ZHANG Min, JIN Mei, WANG Gang, et al. Design and test of double crank planar five-bar reel in rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 115 - 122. (in Chinese)
- [7] 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. Comparison of rape combined harvest and segmented harvest[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 10 - 16. (in Chinese)
- [8] 王华, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 油菜联合收获机串并联组合式液压驱动系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(5): 90 - 98.
WANG Hua, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of series parallel combined hydraulic drive system for rape combine harvester[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(5): 90 - 98. (in Chinese)
- [9] 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): 17 - 25.
RAN Junhui, MU Senlin, LI Haitong, et al. Design and test of reciprocating double acting cutter planetary gear driver for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 17 - 25. (in Chinese)
- [10] 廖宜涛, 陈传节, 舒彩霞, 等. 4SY - 1.8 型手扶式油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 94 - 100.
LIAO Yitao, CHEN Chuanjie, SHU Caixia, et al. Design and test of 4SY - 1.8 walking rape mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 94 - 100. (in Chinese)
- [11] 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 mower[J]. Chinese Agronomy Bulletin, 2017, 33(10): 140 - 145. (in Chinese)
- [12] 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 test of 4SY - 2.0 self-propelled rape mower[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 42(4): 445 - 453. (in Chinese)

1400 - 1409.

- [14] 徐丽明,王应彪,张东兴,等.玉米通用剥皮机构设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(增刊1):14-20.
XU Liming, WANG Yingbiao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of corn universal husker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.1): 14-20. (in Chinese)
- [15] 耿爱军,杨建宁,张姬,等.玉米摘穗收获机械损伤影响因素分析[J].农业工程学报,2016,32(22):56-62.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Ji, et al. Influence factor analysis of mechanical damage on corn ear picking[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 56-62. (in Chinese)
- [16] 李国和,王敏杰,段春争.基于ANSYS/LS-DYNA的金属切削过程有限元模拟[J].农业机械学报,2007,38(12):173-176.
LI Guohe, WANG Minjie, DUAN Chunzheng. Finite element simulation of the process of orthogonal metal cutting based on the ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 173-176. (in Chinese)
- [17] 夏俊芳,贺小伟,余永生,等.基于ANSYS/LS-DYNA的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J].农业工程学报,2013,29(10):34-41.
XIA Junfang, HE Xiaowei, YU Yongsheng, et al. Finite element simulation of soil cutting with rotary knife roller based on ANSYS/LS-DYNA software[J]. Transactions of CSAE, 2013, 29(10): 34-41. (in Chinese)
- [18] 潘海兵,王振亚,陈红,等.宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(12):239-245.
PAN Haibing, WANG Zhenya, CHEN Hong, et al. Design and experiment on dual rollers peeling machine for satsuma mandarin[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 239-245. (in Chinese)

(上接第19页)

- [13] 金诚谦,吴崇友,金梅,等.4SY-2型油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(10):76-79.
JIN Chengqian, WU Chongyou, JIN Mei, et al. Design and test of 4SY-2 rape mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 76-79. (in Chinese)
- [14] 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 test of rape mower finger conveyor chain conveyor[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 11-18. (in Chinese)
- [15] 李平,廖庆喜,李磊,等.4SY-1.8改进型油菜割晒机主要装置设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(1):53-58.
LI Ping, LIAO Qingxi, LI Lei, et al. Design and test of main devices of 4SY-1.8 improved rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 53-58. (in Chinese)
- [16] 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 laying quality of inclined conveying rape mower[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 59-68. (in Chinese)
- [17] 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 mower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 96-105. (in Chinese)
- [18] 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 of laying quality of 4SY-2 rape mower[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 45-48. (in Chinese)
- [19] 李平,廖庆喜,舒彩霞,等.油菜割晒机茎秆铺放质量的故障成因分析与参数匹配研究[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):197-209.
LI Ping, LIAO Qingxi, SHU Caixia, et al. Fault cause analysis and parameter matching research on stalk laying quality of rape mower[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2016, 24(1): 197-209. (in Chinese)
- [20] 林景尧,郑文华.割晒机放铺质量的研究[J].农业机械学报,1983,14(2):66-73.
LIN Jingyao, ZHENG Wenhua. Study on laying quality of windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(2): 66-73. (in Chinese)
- [21] 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 of 4SY-2.9 rape windrower frame[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53-60. (in Chinese)
- [22] 舒彩霞,李磊,严磊,等.4SY-1.8型自走式油菜割晒机机架振动特性的分析[J].华中农业大学学报,2015,34(6):119-124.
SHU Caixia, LI Lei, YAN Lei, et al. Analysis of frame vibration characteristics of 4SY-1.8 self-propelled rape mower[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(6): 119-124. (in Chinese)